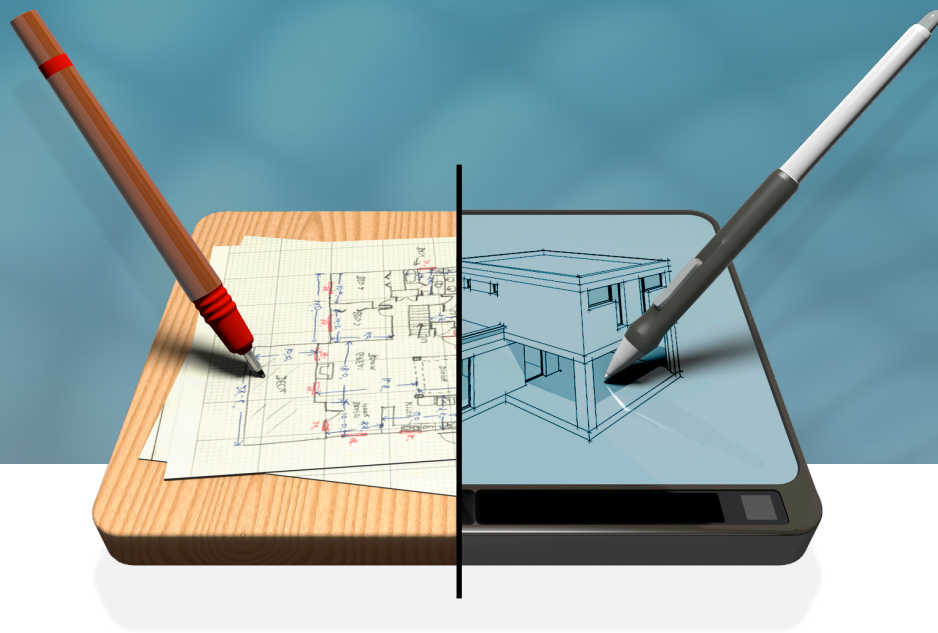




Université de Liège
Année académique 2011-2012

PROCESSUS D'EXTERNALISATION GRAPHIQUE DANS LES ACTIVITÉS COGNITIVES COMPLEXES :

le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective



Dissertation présentée par
Stéphane SAFIN

En vue de l'obtention du titre de Docteur en Psychologie

Devant un jury composé de

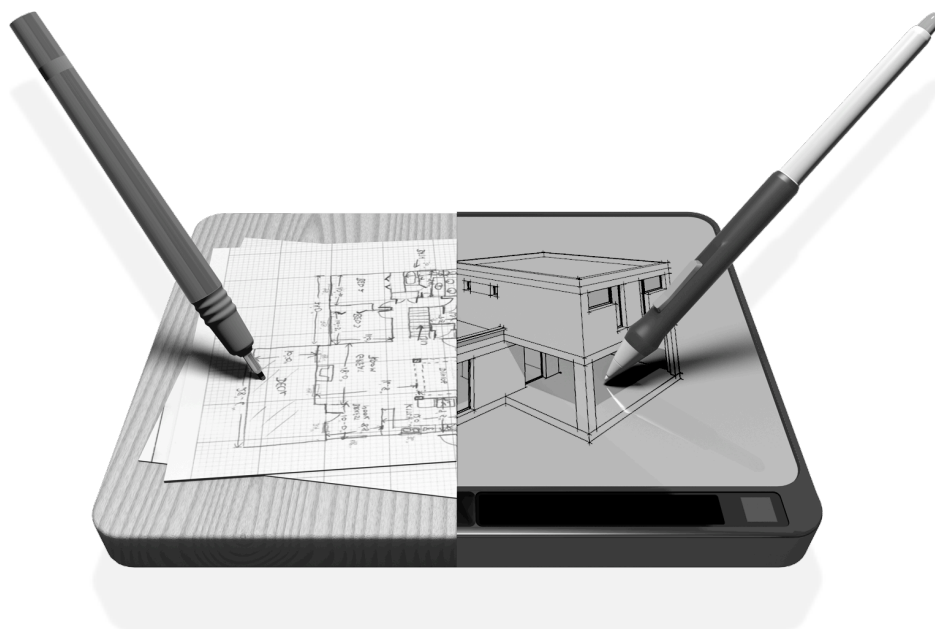
Adélaïde Blavier	Professeure, Université de Liège, Présidente
Laurence Nigay	Professeure, Université Joseph Fourier Grenoble
Françoise Détienne	Directrice de recherche CNRS, Télécom ParisTech
Françoise Decortis	Professeure, Université Paris 8
Anne-Sophie Nyssen	Professeure, Université de Liège, Promotrice
Pierre Leclercq	Professeur, Université de Liège, Promoteur



Université de Liège

Année académique 2011-2012

PROCESSUS D'EXTERNALISATION GRAPHIQUE DANS LES ACTIVITÉS COGNITIVES COMPLEXES : le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective



Dissertation présentée par

Stéphane SAFIN

En vue de l'obtention du titre de Docteur en Psychologie

Devant un jury composé de

Adélaïde Blavier	Professeure, Université de Liège, Présidente
Laurence Nigay	Professeure, Université Joseph Fourier Grenoble
Françoise Détienne	Directrice de recherche CNRS, Télécom ParisTech
Françoise Decortis	Professeure, Université Paris 8
Anne-Sophie Nyssen	Professeure, Université de Liège, Promotrice
Pierre Leclercq	Professeur, Université de Liège, Promoteur

Adresse de correspondance :

Stéphane SAFIN

LUCID-ULg - Lab for User Cognition and Innovative Design

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées - Département ArGEnCo

1, chemin des Chevreuils, Bât B52

4000 Liège - Belgium

+32.4.366.95.14

stephane.safin@ulg.ac.be

www.lucid.ulg.ac.be

Citation

Safin, S. (2011). Processus d'externalisation graphique dans les activités cognitives complexes :le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective. PhD Thesis, University of Liège, Belgium.

Remerciements	13
Avant-propos	15
Chapitre 1 : introduction	17
1. Le projet de conception architecturale	19
2. Notre définition de la conception	25
3. Problématique d'assistance	28
4. Contexte de ce travail	28
5. Structure du document	29
Chapitre 2 : état de l'art	33
1. La cognition externe	35
1.1. Modèles de la cognition externe	35
1.2. Rôles cognitifs des représentations externes	37
Alléger la charge mentale	
Structurer le comportement	
Matérialiser l'information	
Etendre la cognition	
1.3. Liens entre les représentations internes et externes	45
1.4. Efficacité des représentations externes	46
2. La conception d'un point de vue cognitif	49
2.1. Modèles de la conception	49
2.2. Activités cognitives en conception	51
La construction d'une représentation mentale du problème (ou formulation du problème).	
La génération de solutions	
Le raisonnement analogique	
L'évaluation des solutions	
2.3. Stratégies et organisation de l'activité de conception	57
2.4. Conception et créativité	58
2.5. Variabilité interindividuelle dans la conception	61
Expertise	

	Formation	
	Personnalité et capacités	
2.6.	Erreurs en conception	62
2.7.	Spécificités de la conception architecturale	65
	Caractère situé et complexe des problèmes architecturaux.	
	Absence de méthodes prescrites	
	Nature et diversité des représentations.	
	Représentation de la troisième dimensions	
	Rôle central de l'activité de dessin	
	Rôle central du concept	
	Rôle central des analogies	
2.8.	Assistance à la conception	69
	Aide à la structuration du problème	
	Aide à la génération de solutions	
	Aide à l'évaluation de solutions	
	Limites des approches d'aide à la conception préliminaire	
3.	Les représentations externes en conception architecturale	74
3.1.	Instruments pour le dessin	74
3.2.	Objets de la conception : esquisses, modèles et dessins numériques	76
3.3.	Rôle de l'esquisse dans la conception individuelle	79
	Alléger la charge mentale	
	Structurer le comportement et étendre la cognition : conversation du concepteur avec son esquisse	
	Matérialiser l'information	
	Pourquoi l'esquisse est-elle un moyen privilégié?	
3.4.	Propriétés graphiques des esquisses	84
3.5.	Transformation des esquisses et externalisation	87
4.	Dimension collective de la conception	90
4.1.	Acteurs de la collaboration en architecture	91
4.2.	Modes de collaboration en conception	92
4.3.	Activités centrées vers la tâche	93
4.4.	Activités centrées sur le processus	95
	Deux modes de synchronisation	
	Awareness	
	Gestion des points de vue et grounding	
4.5.	Activités de gestion de l'interaction	99
	Communication et collaboration	
	Rôle de la distance	
4.6.	Objets médiateurs en conception collaborative	103
	Annotations	
4.7.	Qualité de la collaboration	106

4.8.	Soutien informatisé à la conception collective	108
5.	L'esquisse numérique	111
5.1.	Outils à usage individuels	113
	Dispositifs matériels	
	Interprétation de croquis	
	Modélisation 3D sur base d'esquisses	
5.2.	5Les outils de collaboration	118
	Espaces de réunion	
	Annotation de documents	
	Dessin collaboratif à distance	
5.3.	Evaluations de ces systèmes	121
5.4.	Enjeux	122

Chapitre 3 : questions de recherche **125**

1.	Contexte : outils d'esquisse numérique développés au LUCID	127
1.1.	Philosophie des dispositifs	127
	L'ordinateur invisible	
	Objectifs des logiciels	
1.2.	Description des dispositifs	131
	Le Bureau Virtuel	
	EsQUIsE	
	SketSha	
1.3.	Augmentations visées par ces dispositifs	138
	Augmentations liées au papier numérique	
	Des augmentations liées à l'interprétation des croquis (EsQUIsE)	
	Des augmentations liées au partage de dessins (SketSha)	
	Limites des dispositifs	
2.	Questions de recherche	143
3.	Etudes	145
4.	Méthodologie générale	147

Chapitre 4 : première étude

149

Usage d'un environnement d'esquisse numérique et d'un modèle 3D auto-généré

1.	Introduction	151
2.	Méthode	152
2.1.	Choix des participants	155
2.2.	Tâche	155
2.3.	Dispositif	156
2.4.	Traitement des données	157
3.	Description des activités	158
3.1.	Situation 1 : Environnement papier-crayon	158
	Outils	
	Productions graphiques	
	Déroulement de l'activité	
	Démarche observée	
3.2.	Situation 2 : Bureau Virtuel et EsQUIse Prototype 1	161
	Outils	
	Productions graphiques	
	Déroulement de l'activité	
	Démarche observée	
3.3.	Situation 3 : Bureau Virtuel et EsQUIse deuxième version (Prototype 2)	164
	Outils	
	Productions graphiques	
	Déroulement de l'activité	
	Démarche observée	
4.	Comparaison entre les activités	166
4.1.	Conception en superposition	166
4.2.	Utilisation des coupes, élévations, dessins en perspective et modèle 3D	169
	Occurrence des coupes, élévations et perspectives	
	Utilisation du modèle 3D et des dessins en perspective	
5.	Discussion	170
5.1.	Nature des esquisses sur le logiciel EsQUIsE	170
5.2.	Un dialogue avec la machine maîtrisé	172
5.3.	Organisation émergente de la conception en superposition	172
5.4.	Usage de la 3D	173
5.5.	Influence des modalités de construction du modèle 3D sur l'activité de conception	174

5.6.	Evaluation des usages : vers d'autres modes d'interaction avec l'esquisse numérique	175
6.	Conclusions de la première étude	176
 Chapitre 5 : deuxième étude		 179
Influence du dispositif d'esquisse numérique et de l'interprétation de croquis sur l'activité graphique en tâche de conception		
1.	Introduction	181
2.	Méthodologie	182
2.1.	Dispositif expérimental	182
2.2.	Grilles d'analyses	184
3.	Caractéristiques des croquis	185
3.1.	Croquis sur papier-crayon	185
3.2.	Croquis sur la palette graphique	186
3.3.	Croquis sur EsQUiSE	188
3.4.	Comparaisons	189
4.	Utilisation temporelle des calques et supports	190
4.1.	Utilisation des calques sur papier-crayon	190
4.2.	Utilisation des calques sur la palette graphique	192
4.3.	Utilisation des calques sur EsQUiSE	193
4.4.	Comparatifs	194
5.	Activité de mise au net	195
5.1.	Mise au net sur papier-crayon	195
5.2.	Mise au net sur palette graphique	197
5.3.	Mise au net sur EsQUiSE	197
5.4.	Comparaison des activités dans les trois environnements	198
6.	Discussion	201
6.1.	Différents types d'esquisses et modes de transformations	202
6.2.	Influences de l'interprétation du dessin et de la 3D sur l'activité	202
6.3.	Influences des interfaces-esquisses sur l'activité graphique	203
6.4.	Modalités d'interaction dans les interfaces-esquisses	205
7.	Conclusion de la deuxième étude	208

Chapitre 6 : troisième étude 211

Utilisation de l'esquisse numérique comme instrument de collaboration distante

1.	Objectifs	213
2.	Dispositif	214
3.	Recueil de données	216
4.	Analyse des données	217
4.1.	Analyse de la qualité de la collaboration	217
4.2.	Documents utilisés et échangés en séances collaboratives	219
4.3.	Présence et types d'annotations	224
4.4.	Analyse de l'activité d'annotation	228
4.5.	Analyses statistiques	228
5.	Résultats	229
5.1.	Description des activités	229
	Groupe 1	
	Groupe 2	
	Groupe 3	
	Comparaison des modes de travail des trois groupes	
	Analyse transversale de l'utilisation des outils de collaboration	
5.2.	Qualité de la collaboration	239
5.3.	Analyse des représentations	243
	Type de représentations utilisées	
	Différences entre les groupes	
	Groupe 1	
	Groupe 2	
	Groupe 3	
5.4.	Utilisation des annotations numériques	250
	Propriétés graphiques des annotations	
5.5.	Synthèse de l'utilisation des documents	255
5.6.	Analyse dynamique de l'usage des annotations	257
	Fonctions des annotations	
	Lien en forme et fonction des annotations	
5.7.	Pratiques différenciées d'annotation	262
	Variabilité entre individus	
	Variabilité selon le groupe	
6.	Discussion	265

6.1.	Synthèse : comparaison des modes de collaboration dans les trois groupes	265
6.2.	L'utilité de l'esquisse numérique comme instrument de collaboration	267
6.3.	Utilisation des différentes représentations en conception	269
6.4.	Critique méthodologique	270
	Grille de la qualité de la collaboration	
	Analyse des traces graphiques	
	Analyse des annotations	
6.5.	Amélioration du dispositif pédagogique	272
6.6.	Améliorations du dispositif technologique	274
7.	Conclusion	276

Chapitre 7 : Conclusions **279**

1.	Discussion générale	281
1.1.	Synthèse de notre approche	281
1.2.	L'esquisse numérique n'est pas un dispositif intrinsèquement naturel. Il est porteur de contraintes.	283
1.3.	La présence de représentations externes auto-générées change radicalement la structure de la tâche.	286
1.4.	L'esquisse numérique est un moyen polyvalent de collaboration	287
1.5.	Atouts de l'esquisse numérique comme mode d'externalisation	288
1.6.	Activité de conception	289
1.7.	Prise de décision graphique en conception préliminaire	291
1.8.	L'utilisation des représentations externes graphiques en conception	292
1.9.	Modèle de la conception préliminaire en architecture	294
1.10.	L'esquisse numérique comme mode de représentation particulier	295
1.11.	Recommandations pour la conception de dispositifs d'esquisse numérique	297
1.12.	Critique de ce travail	299
1.13.	Perspectives	300
2.	Epilogue	302
3.	Bibliographie	304

ANNEXES **317**

Remerciements

Ce travail est le fruit d'une action collective. Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au succès de cette entreprise.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mes co-promoteurs de doctorat, Anne-Sophie Nyssen et Pierre Leclercq, pour leurs précieux conseils, leur sens critique et leur soutien. Merci aussi aux membres de mon comité d'accompagnement de doctorat, Adélaïde Blavier et Françoise Decortis, pour avoir notablement influencé ces travaux, par les riches discussions que nous avons eues.

Je remercie aussi évidemment mon jury de thèse. Merci d'avoir pris le temps de lire et critiquer ce travail, bien sûr, mais merci aussi de m'avoir pour certains depuis longtemps déjà soutenu, conseillé, outillé, encouragé.

Au-delà de ce travail, c'est aussi 7 ans de collaboration avec le LUCID, d'abord en tant que chercheur partenaire, puis comme membre de l'équipe à part entière, que je souhaite saluer ici. Pierre, merci de m'avoir fait toujours confiance, merci d'avoir partagé ton enthousiasme et merci pour cette belle aventure que fut – et qu'est toujours – le LUCID. Merci de tous les efforts que tu as mis en place pour que nous puissions mener à bien notre collaboration, dont ce document est à la fois un aboutissement et un premier pas. Merci à l'ensemble des membres présents et passés de l'équipe du LUCID qui, directement ou indirectement, ont contribué à ce travail, par leurs encouragements, leurs critiques, leurs réflexions, leur travail, leur humour et leur amitié tout simplement : Sleiman Azar, Arnaud Bonmariage, Christelle Boulanger, Isabelle Cecchini, Adrien Dawans, Arnaud Dawans, Aurore Defays, Vincent Delfosse, Jean-Noël Demaret, Anne Detheux, Olivier Dewispelaere, Catherine Elsen, Aurélie Jeunejean, Astrid Lejeune, Nicolas Lekeux, Cyril Lorquet, Didier Mans, Geneviève Martin, Dimitri Schmitz, Vincent Schoonbroodt, John Schrayen, Géraldine Schroyen, Benjamen Stévens, Rachelle Vafidis, Anne VandeVreken et Jean-François Vandamme. Un merci tout spécial à Marine Maréchal pour son soutien logistique et son enthousiasme à toute épreuve. Un merci aussi tout particulier à Roland Juchmes qui a accompagné les réflexions de ce travail et les a plus que substantiellement nourries. Ce travail est aussi un peu le tien...

Merci à ceux qui ont mis la main à la pâte pour m'aider dans cette entreprise : étudiants en stage, mémorants, co-auteurs d'articles ou encore partenaires scientifiques de projets. Toutes ces personnes ont rendu ce travail possible. En particulier, merci à Charlotte Pierson, Miguel Thiry et Aurélie Verschuere. Merci aussi aux étudiants qui ont participé au jeu de l'expérimentation et qui se sont laissés observer parfois même avec un certain enthousiasme.

Je tiens aussi à remercier ici mes « mentors », ces personnes qui, dans le champ de l'architecture, de l'ergonomie ou de l'interaction homme-machine, ont permis d'influencer mes travaux par leurs réflexions, qui m'ont soutenu, accordé leur confiance, et poussé en avant : Françoise Decortis, Pierre Leclercq, Françoise Détienne, Françoise Darses et Jean-Marie Burkhardt notamment.

Mes remerciements formels vont au Conseil de la Recherche de l'Université de Liège qui, via un mandat de finalisation de doctorat, m'a fourni le cadre nécessaire à l'accomplissement de la dernière année de ce travail, à la Région Wallonne (DG06), la Commission Européenne, l'Agence Nationale pour la Recherche française et le CGRI, qui ont aussi financé les projets couvrant mes six années précédentes d'implication à l'Université, m'ayant permis d'accomplir ce travail. Les

derniers jours de ce travail ont aussi été financés avec le support de la Communauté française de Belgique - Actions de recherche concertées, projet COMMON - Académie Wallonie-Europe.

Merci aussi à André Lecomte de l'Agence d'architecture Helium3 pour les illustrations et à Arnaud Matagne pour le laborieux travail de mise en page.

Je tiens tout naturellement à remercier mes proches amis. La liste est longue mais leur support fut essentiel dans toutes les étapes de ce travail. Merci à ma formidable équipe de relecteurs qui a traqué fautes, coquilles et formulations hasardeuses avec entrain, bonne humeur et parfois avec un brin de moquerie : Alexia, Arnaud, Axelle, Dricou, Laura, Marjo, Séba, Vinvin et Vivi. Merci à ceux qui n'ont pas relu, mais dont le soutien moral fut tout aussi important : Dams, Charles, Guilz, Alexis, Thomas, Dany, Leila pour ne citer qu'eux (les nombreux autres me pardonneront). En particulier, je remercie Benjamin pour les longues, longues heures passées à m'aider, depuis longtemps déjà, dans la lourde entreprise que constitue la rédaction d'un texte, sinon agréable, à tout le moins lisible.

Merci aussi à ma famille, mes deux frères Antoine et Frédéric et mon père pour leur soutien indéfectible. Merci aussi et surtout à Maman, qui, au long de toutes les étapes qui ont jalonné mon - long - parcours d'étudiant, m'a toujours supporté et aidé avec un dévouement hors du commun.

Enfin, merci à toi Laure. De m'avoir aidé, de m'avoir supporté, de m'avoir consolé. Merci pour tout, pour le reste et pour bien plus encore.

Et pour conclure, je souhaite dédier ce travail à ma filleule Eva, au petit Samuel et à la petite Lou qui nous ont rejoint pendant que j'écrivais les dernières lignes de ce travail, et à ce petit neveu qui ne tardera pas à venir agrandir la famille.

Avant-propos

Tous les jours, nous utilisons des artifices pour nous aider à penser et à agir. Nos téléphones portables retiennent pour nous les numéros de nos connaissances, l'omniprésence d'Internet nous invite à toujours chercher des réponses à nos questions, nos ordinateurs nous permettent de nous retrouver dans des masses importantes de données complexes, les réseaux sociaux nous maintiennent en contact avec notre entourage, les GPS guident nos déplacements, nos agendas électroniques nous rappellent nos rendez-vous sans que nous devions y penser, nos *smartphones* nous permettent d'accomplir de nombreuses tâches du quotidien (consulter nos comptes bancaires, gérer nos cartes de fidélité, planifier nos itinéraires, etc.) que nous n'avions pas l'habitude d'accomplir ou qui s'avéraient fastidieuses, etc. Ces bouleversements technologiques, s'ils sont souvent utiles pour nos activités, ont aussi des impacts sur notre manière de penser, nos connaissances et nos habitudes : nous ne retenons plus nos numéros de téléphone, nous perdons l'habitude d'utiliser des plans et des cartes, notre orthographe se détériore probablement, nous écrivons de moins en moins à la main, etc.

La pensée humaine agit toujours en interaction avec l'environnement dans lequel elle s'inscrit. En particulier, pour mener à bien nos activités cognitives, nous utilisons des outils et des représentations, externes aux limites strictes de notre cerveau. La technologie change notre rapport à l'information et même la structure de nos raisonnements. Tel est le champ dans lequel s'inscrit ce travail : mieux comprendre les rapports qu'entretiennent la pensée humaine et les représentations externes qu'elle mobilise.

Dans ce cadre nous nous intéressons plus particulièrement aux modes d'externalisation de la pensée sur un mode graphique. Certaines activités cognitives passent en effet par l'expression sous forme de dessins, d'images ou de diagrammes. Les schémas explicatifs, les annotations de documents ou les croquis nous aident à formuler des idées, à synthétiser de l'information, à communiquer ou à raisonner. Pour mieux comprendre le rapport que nous entretenons avec nos productions graphiques, nous avons fait le choix d'étudier l'impact des nouveaux médias d'expression graphique dans le domaine de l'architecture et, en particulier, les dessins d'esquisse numérique.

L'esquisse est en effet un outil important et structurant de la conception architecturale. En conception, l'architecte converse avec lui-même ou avec d'autres par l'intermédiaire des représentations qu'il construit. Le dessin à main levée permet l'immédiateté et la souplesse nécessaires à la fluidité de ces conversations personnelles ou partagées.

Pour cette raison, malgré la prolifération d'outils très performants de dessin informatisé permettant de construire des représentations précises de bâtiments et de fournir au concepteur de puissantes simulations, le croquis conçu avec les outils traditionnels (le papier, le crayon, le feutre, etc.) reste un moyen privilégié de la pensée architecturale. Le croquis intervient à la fois comme instrument de simulation mentale et d'idéation dans les premières étapes créatives de la conception, et à la fois comme support à la conception collective, en tant qu'outil d'annotation dans des réunions de revue de projet.

Alors que ce rôle médiateur de la pensée et de la communication par l'esquisse est largement reconnu, et que les avantages cognitifs des outils traditionnels à main levée justifient leur utilisation par les acteurs de la conception, le développement exponentiel des nouveaux dispositifs d'interaction dans les environnements informatiques permettent désormais l'émergence d'un nouveau champ applicatif pour les métiers de la conception : l'esquisse numérique. Il s'agit de permettre à l'architecte de dessiner à main levée, de la même manière qu'avec ses outils

traditionnels, mais dans un environnement informatique. L'idée est ainsi de tirer profit de la facilité d'utilisation du stylo, tout en exploitant les capacités de simulation ou de représentation du média numérique, pour apporter un soutien au concepteur, dans des moments au cours desquels aucun support informatique n'était amené jusque là ou dans lesquels ces supports s'avéraient inappropriés. L'avènement de ces nouveaux dispositifs pose un certain nombre de questions, du point de vue de leur usage et de leur rôle en tant qu'artefacts cognitifs. En effet, dans le développement de ces systèmes, la facilité d'interaction est souvent posée d'emblée, à la manière d'un postulat. Les augmentations et bénéfices apportés par l'esquisse sont souvent supposées comme utiles pour les concepteurs, sans que des études approfondies de leur usage ne soient pourtant menées.

Nous proposons d'investiguer cette question de l'intérêt et de l'apport de l'esquisse numérique dans la conception architecturale, mais aussi des contraintes qu'elle véhicule en tant qu'instrument de la pensée individuelle et collective. Nous cherchons aussi à identifier l'impact du mode d'interaction que constitue le stylo électronique sur l'activité graphique et cognitive en tâche de conception.

Cette thèse est l'aboutissement d'un travail de sept années de recherche et développement en ergonomie logicielle au sein du LUCID-ULg, Lab for User Cognition & Innovative Design (Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège), spécialisé dans les nouvelles technologies d'Interaction Hommes-Machines pour la conception.

Elle se base sur les différentes thématiques qui ont composé notre parcours, toutes relatives aux représentations externes en conception architecturale. Elle a pour objectif de mieux comprendre l'interaction entre la cognition et son environnement matériel et informationnel, et en particulier d'identifier les rapports entre les activités cognitives et les modes de représentations qu'elles mobilisent. Elle investigate le concept original de l'esquisse numérique, tel que développé notamment au LUCID, identifie ses caractéristiques, précise son rôle et révèle son utilité en conception individuelle et collective.

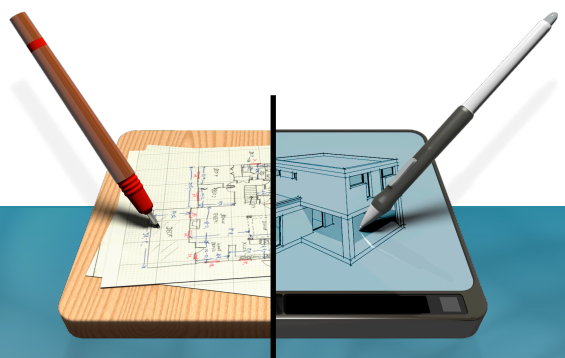
Ce travail de doctorat repose sur les différentes recherches que nous avons menées dans le cadre du développement des logiciels exclusifs EsQUIsE et SketSha et se complète par de nombreuses études menées dans le cadre d'un précédent DEA, de deux programmes SPW WIST (Programmes ICC 2004-2007, AURALIAS 2007-2010), d'un programme ANR (CoCréa 2009-2011), de deux collaborations WBI Tournesol, ou encore dans l'encadrement de nombreux stages et mémoires de master.

Cette thèse repose sur trois études empiriques et poursuit deux objectifs complémentaires.

- D'une part, il aborde un volet fondamental, qui vise à étudier et à comprendre les avantages et limitations de l'esquisse numérique, en tant qu'artefact cognitif de la conception. Il cherche aussi à apporter une approche originale de l'activité de conception architecturale, en abordant spécifiquement l'activité graphique de dessin à main levée, dans une perspective dynamique. Il vise également à proposer des méthodes de description des activités cognitives en conception par l'intermédiaire de l'étude des productions de représentations dans ces activités, c'est-à-dire par l'analyse graphique des dessins d'esquisse. Il vise enfin à mieux cerner la dynamique de l'externalisation dans les activités cognitives complexes.
- D'autre part, cette thèse poursuit aussi un second objectif, applicatif, et se veut donc aussi inscrite dans le développement d'outils de réalité mixte de génération future. Notre travail contribuera ainsi parallèlement à des recommandations, des prescriptions et de nouveaux cadres d'analyse pour le développement d'environnements technologiques de soutien à la conception à base d'esquisses.

CHAPITRE 1

Introduction



Dans ce chapitre, nous dressons le contexte de ce travail. Dans un premier temps, nous décrivons synthétiquement ce qu'est un projet d'architecture. Nous tentons ensuite de proposer une définition de la conception architecturale, qui structurera nos questionnements. Nous décrivons brièvement la problématique générale dans laquelle nous nous situons, à savoir l'assistance à la conception sur base d'esquisse et évoquons le contexte scientifique et technologique dans lequel ce travail s'est déroulé. Nous terminons par un plan du document.

1. Le projet de conception architecturale

La réalisation d'un projet architectural comprend de nombreuses étapes, fait appel à différents acteurs et utilise des ressources et représentations variées (Prost, 1992).

Les différents acteurs du projet sont l'architecte ou le groupe d'architectes (appelés « maître d'œuvre »), le client ou commanditaire (appelés « maître d'ouvrage »), les différents spécialistes intervenant à des moments-clés du processus de conception (ingénieurs et techniciens spécialisés, auditeurs énergie, etc.), les autorités de régulation (notamment pour l'obtention d'un permis d'urbanisme) et les différents acteurs du chantier (entrepreneurs mais aussi gestionnaires de sécurité, planification, etc.).

Un projet d'architecture débute par la prise de connaissance d'une demande de la part d'un client et se termine par la construction ou la rénovation d'un bâtiment. Le projet architectural démarre d'un *programme*, qui définit le cahier des charges du bâtiment. Ce programme est une ressource structurante du processus de conception. Il peut être préalablement défini par le maître d'ouvrage et être figé dans un document, comme dans le cas de concours. Il peut aussi être construit par l'architecte, en collaboration avec le client, et pourra évoluer en cours de conception en fonction des idées de l'architecte et des commentaires du maître d'ouvrage.

Le projet en tant que tel s'inscrit dans une durée variable de quelques semaines à quelques années. Il souffre aujourd'hui d'une fragmentation dans son déroulement. Ce découpage, dû à une attribution légale des responsabilités, implique un enchaînement linéaire de différentes étapes¹, mobilisant des représentations de nature variée et l'utilisation de multiples outils, informatiques ou non. Nous synthétisons le déroulement d'un projet d'architecture de la façon suivante (Figure 1).

La première étape est la phase créative au cours de laquelle l'architecte génère les idées principales et structurantes. Dans le même temps émergent les contraintes et se fixent les critères qui concourent à cerner le problème architectural (Leclercq, 2005). Cette étape aboutit à la génération des premiers concepts du bâtiment, à l'identification d'un certain nombre de contraintes et à une première expression spatialisée et esthétique du projet. Alors que l'ensemble des étapes

¹ A noter que le nom des étapes définies ci-dessous peut varier selon les pays et les réglementations.

ultérieures du projet sont largement outillées par l'informatique, la phase créative repose encore en grande partie sur l'utilisation d'esquisses papier-crayon.

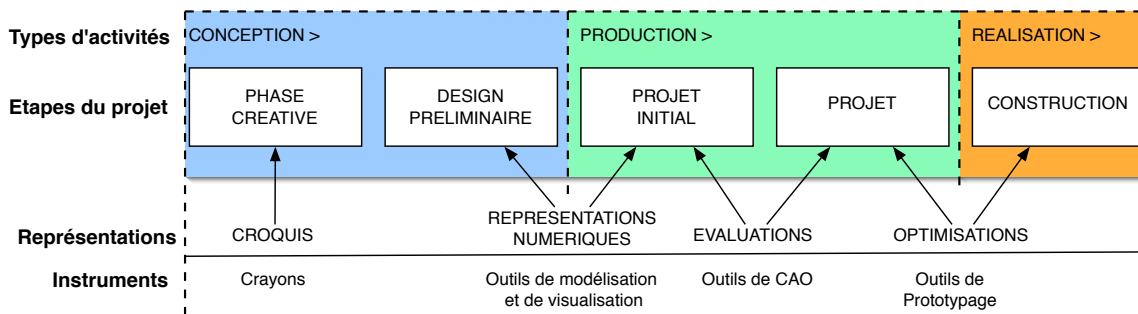


Figure 1
Etapes du projet architectural.

Au terme de cette phase de recherche conceptuelle, l'architecte construit le design préliminaire, ou avant-projet sommaire. Une étape de codage souvent fastidieuse est alors nécessaire pour aboutir aux premières représentations numériques. Ces premiers modèles visent essentiellement à étudier la faisabilité de la solution envisagée. Ces représentations, bien qu'encore succinctes, sont vérifiables géométriquement et permettent déjà d'éprouver et d'affiner le concept du bâtiment. Cette étape préliminaire relève toujours de la conception : les idées sont générées, éprouvées, modifiées avec parfois des modifications qualitatives importantes entre deux versions. Les outils utilisés sont généralement des outils simples de modélisation (logiciels de dessin assisté par ordinateur - DAO - ou modélisateurs 3D sommaires).

S'en suit l'étape du projet initial - ou avant-projet détaillé - aboutissant à un dossier graphique et textuel décrivant le bâtiment dans son ensemble. Ces documents sont précis et structurés, car nécessaires pour l'obtention d'un permis d'urbanisme. Outre les plans et modèles issus des outils de visualisation, des premières représentations sont construites à l'aide d'outils de CAO (conception assistée par ordinateur) et permettent d'effectuer des évaluations de performance. Par exemple, une directive européenne oblige les architectes et les autorités de régulation à vérifier la performance énergétique des bâtiments (PEB) pour toute nouvelle construction. Or, le calcul de cette PEB - tel qu'implémenté en Belgique - nécessite de connaître les dimensions précises, les matériaux, les orientations et les adjacences de chacune des parois et donc de disposer d'un modèle complet du bâtiment². Cette étape du projet initial est avant tout une phase de résolution géométrique exhaustive et de paramétrisation de l'objet. En ce sens, elle ne participe plus de la conception (au sens créatif du terme) mais de la production.

L'étape du projet consiste en la définition exhaustive et la paramétrisation complète de l'objet architectural en vue de construire des plans communicables aux différents acteurs de la construction. Cette étape aboutit à des cahiers des charges pour les entrepreneurs et à des plans d'exécution. Ces documents contiennent toute l'information nécessaire et suffisante pour représenter complètement l'objet et pour permettre dès lors sa réalisation sans aucune ambiguïté

² Nous avons participé à la réalisation du modèleur du logiciel de calcul de la PEB utilisé dans les régions wallonne et Bruxelles-Capitale (Juchmes *et al.*, 2009). Si un des objectifs était lié à la possibilité de simulations précoces, en phase de design préliminaire voire en phase créative, la complexité et le nombre conséquent de paramètres à encoder, ainsi que l'absence de spécifications par défaut rendent difficile l'utilisation de ce moteur de calcul pour les phases créatives. Ce projet nous a concrètement montré à quel point il était nécessaire, pour permettre ces simulations en phases précoces, d'adopter d'autres logiques basées sur des descriptions incomplètes du bâtiment.

(Leclercq & Elsen, 2007). Ces plans doivent être dessinés avec des logiciels sophistiqués pour atteindre ces objectifs d'exhaustivité et d'univocité. En outre, les équipes de conception peuvent s'appuyer à cette étape sur différents outils d'optimisation pour effectuer les meilleurs choix techniques. Des outils sophistiqués de simulation acoustique permettront ainsi de sélectionner des matériaux et leur emplacement pour obtenir le meilleur confort acoustique possible.

Enfin, lors de la phase de construction, l'architecte supervise le chantier, résout différents problèmes locaux et éventuellement procède à quelques ajustements. Même si toutes les décisions sont prises préalablement à cette étape, il arrive en effet fréquemment que les choix techniques évoluent au cours du chantier et que le bâtiment final ne corresponde pas exactement à sa définition dans le cahier des charges ou dans les plans d'exécution. Dans certains cas, les représentations de l'objet architectural évoluent aussi dans cette étape : les plans sont modifiés en cours de chantier pour correspondre à la réalité (les plans décrivant exactement les résultats du chantier portent un nom particulier : les plans *as-built*)

A chaque étape correspondent donc des représentations graphiques différentes de l'objet. Nous montrons ici des exemples de ces différentes productions, tirées d'un projet réel, consistant en une rénovation d'anciens bâtiments industriels³.

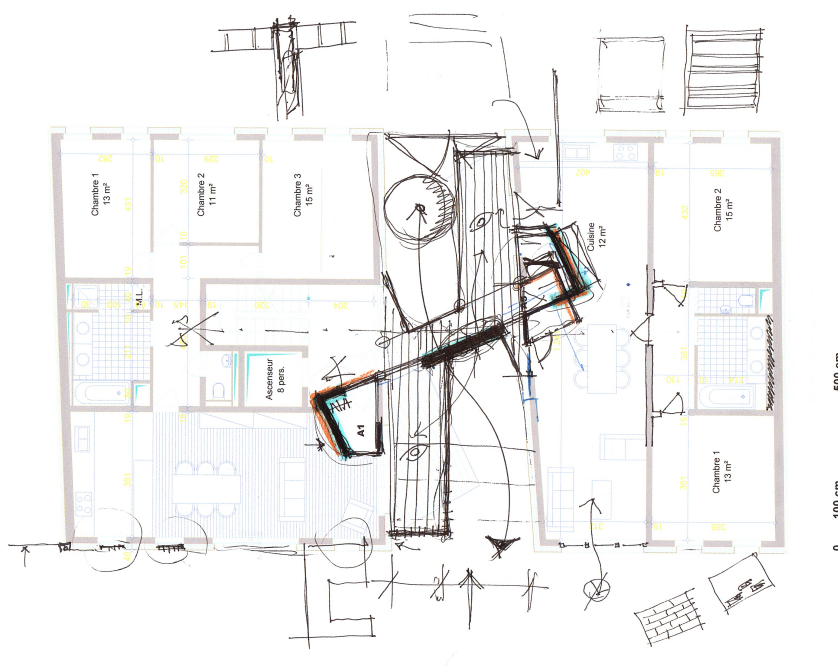


Figure 2
Esquisse sur fond de plan (implantation avant rénovation), phase créative.

³ PROJET RECYCL'AIR - Construction de logements et réhabilitation de l'ancienne halle d'imprimerie Martino à Seraing. Projet de l'agence Helium3 architectures, rue des vingt-deux, n°43 à Liège.



Figure 3

Plans et coupe sommaires, étape de design préliminaire (documents présentés lors du concours).

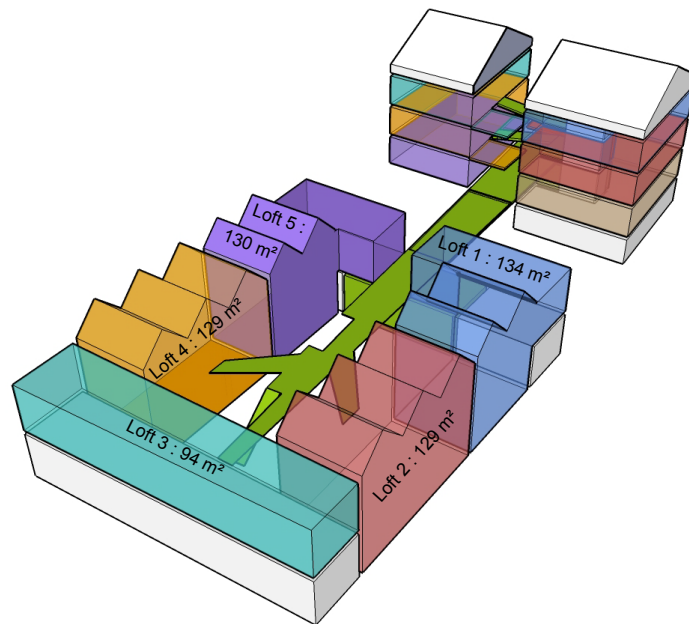


Figure 4

3D sommaire, étape de design préliminaire (document présenté lors du concours).

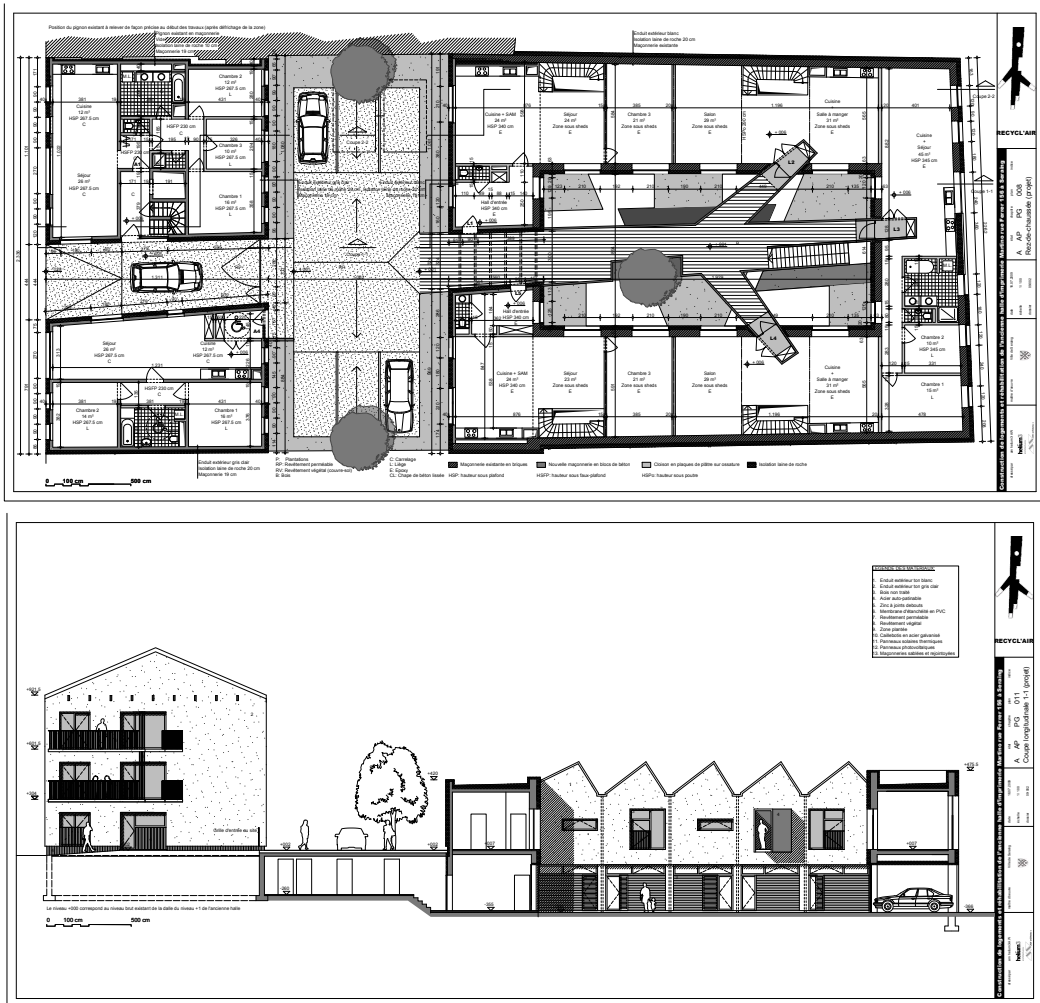


Figure 5 :
plan et coupe, projet initial.

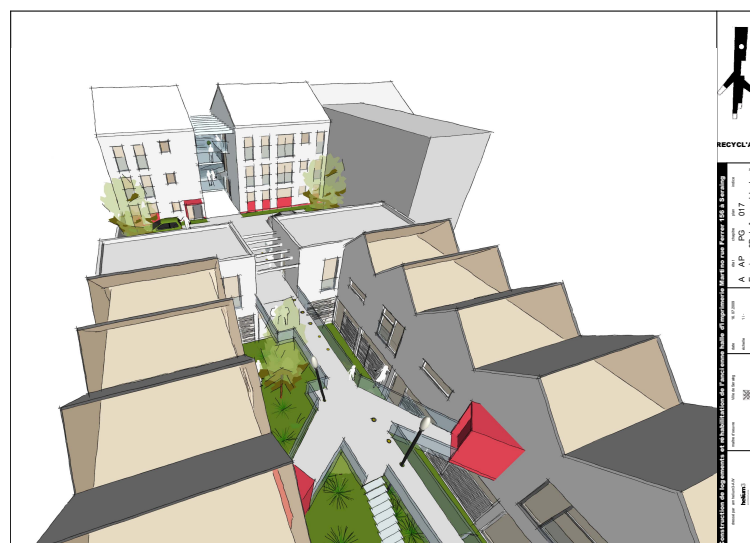


Figure 6
Modèle 3D, projet initial.



Figure 7
Plans, coupes et élévations, projet final (demande de permis d'urbanisme).

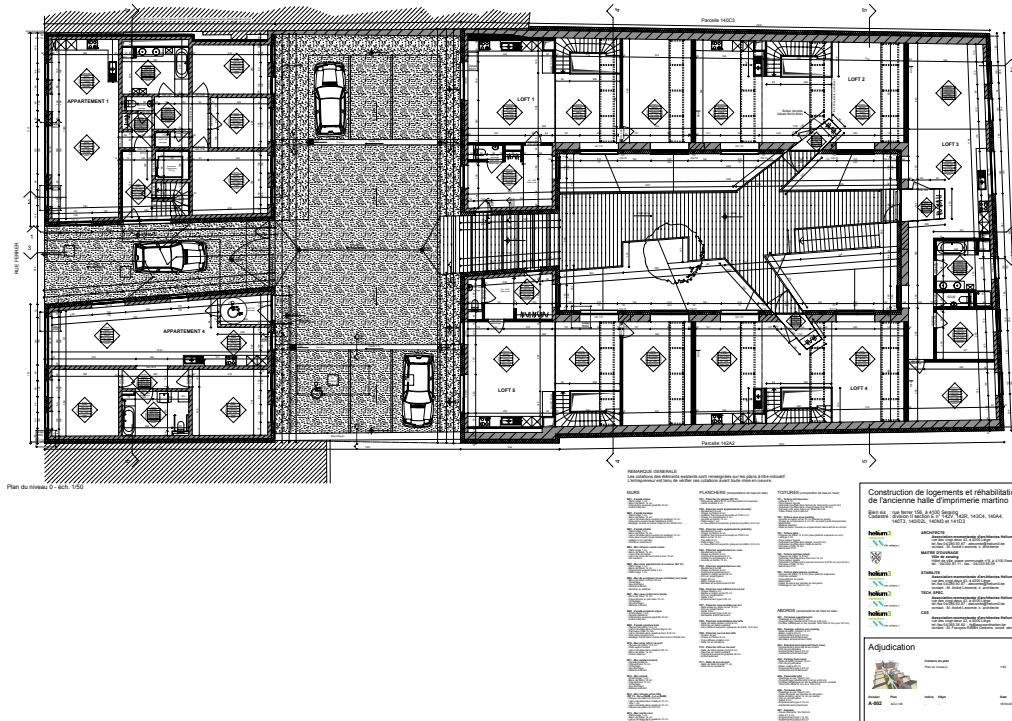


Figure 8
Plan d'exécution (communiqué aux entrepreneurs pour la construction).

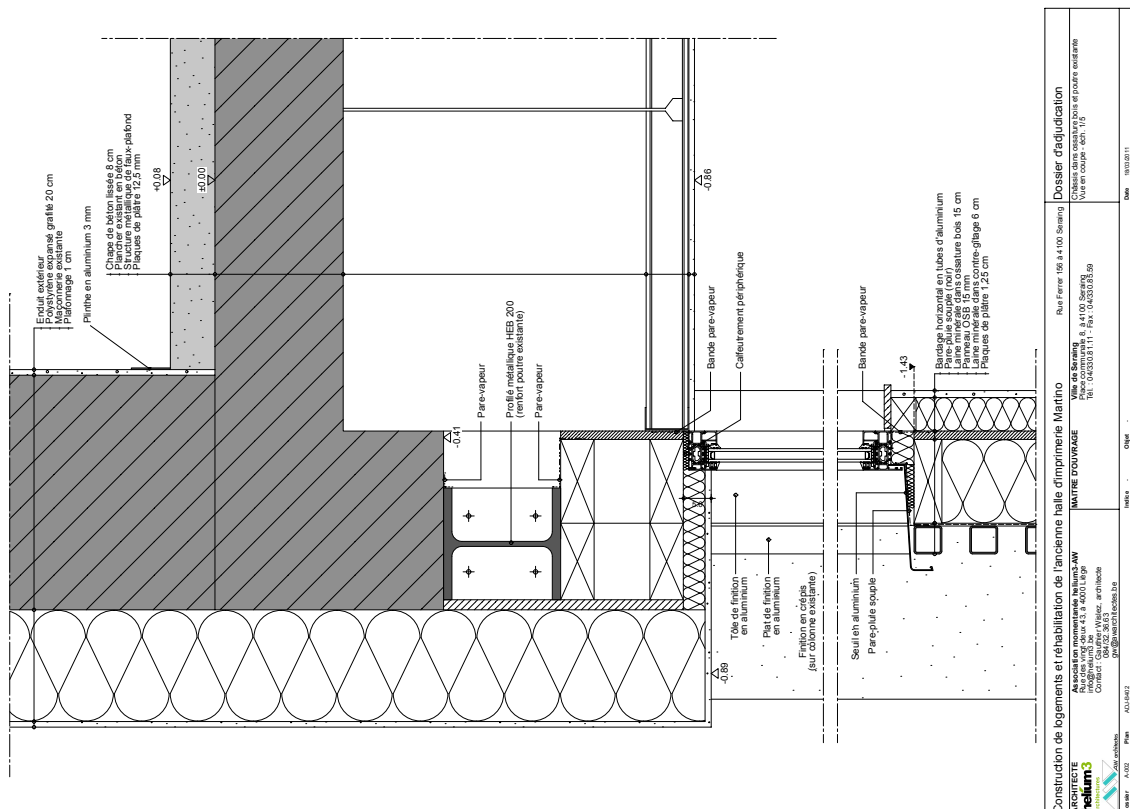


Figure 9
 Détail d'exécution (communiqué aux entrepreneurs pour la construction).

Notre travail s'intéresse à la première phase du projet architectural : la conception préliminaire. Comme évoqué, cette activité est encore peu outillée par des logiciels, notamment du fait de ses particularités que nous décrivons en détail dans la suite de ce document. Notre objectif est de comprendre cette activité dans ses spécificités en vue de fournir des recommandations à des développeurs pour l'outiller de manière pertinente.

2. Notre définition de la conception

Après avoir abordé succinctement les limites et la dynamique du projet d'architecture, il convient d'énoncer clairement la définition de la conception que nous utiliserons dans ce travail. En effet, cette appellation recouvre une réalité large.

D'un point de vue général, la conception est un **processus** qui consiste à créer un **nouvel objet**, qu'il soit matériel (bâtiment, produit, machine, etc.) ou immatériel (logiciel, texte, etc.). Les différentes définitions de la conception couramment utilisées en ergonomie (voir notamment Darses, 2005 ; Visser, 2006, Bonnardel, 2009) partagent le même tronc commun :

- l'existence de données de départ (souvent sous la forme d'un *programme*) ;
- un processus de transformation (d'un état initial à un état final) ;
- la satisfaction de buts, l'adaptation au contexte ;

- l'émergence d'un produit (matériel ou immatériel) ;
- l'explicitation de son fonctionnement.

Nous empruntons à Visser une définition générale de l'activité de conception. « *La conception consiste à spécifier un artefact (l'artefact produit), à partir de spécifications de départ qui indiquent - en général de façon ni explicite, ni exhaustive - les fonctions à remplir par l'artefact, ainsi que les besoins et buts qu'il doit satisfaire, étant donné certaines conditions (exprimées par des contraintes)* » (Visser, 2009b, p. 71).

La conception peut être définie très largement, en tant qu'activité cognitive générale, ou au contraire être circonscrite en fonction de plusieurs de ses caractéristiques.

Un premier moyen de distinguer plusieurs classes d'activités de conception est de les définir suivant leur domaine d'application. On distinguera ainsi la conception architecturale de la conception logicielle, mécanique ou encore du *design* de produit. Si, partant du constat que tous les domaines de la conception partagent des dynamiques de travail et mobilisent certaines activités cognitives semblables, la définition classique en ergonomie est celle d'une activité cognitive générale, non limitée à un statut professionnel, à une catégorie de personnes ou à un domaine particulier (Darses, Falzon, & Béguin, 1996), il nous semble important, au regard de la visée applicative de ce travail, de s'intéresser spécifiquement au domaine de l'architecture. En effet, les développements logiciels auxquels nous participons visent un soutien à la conception architecturale, qui se distingue des autres domaines notamment car elle mobilise des notions telles que l'émotion, le fonctionnement et l'intégration (voir chapitre 2, point 2.7). Ces développements font appel à une sémantique particulière et sont basés sur des modèles d'activités spécifiques. A l'instar de Norman (1998), nous pensons également que la simplicité et l'intelligence des dispositifs informatiques viennent de ce qu'ils sont adaptés à des utilisateurs, activités et contextes spécifiques, et que la tentation de réaliser des outils pour tous et pour tout faire mène inévitablement à un accroissement de leur complexité d'utilisation. Notre objectif applicatif de soutien à la conception préliminaire architecturale nécessite donc de comprendre cette activité dans ses spécificités propres, sans occulter bien entendu les points communs et les divergences qu'elle entretient avec d'autres domaines.

Le degré d'innovation ou de nouveauté peut également définir la conception. Darses (2004) distingue ainsi les problèmes de conception selon leur degré d'innovation : la conception routinière, innovante et créative. La conception routinière engendre principalement des problèmes de configuration. L'espace-problème est bien défini et mobilise des opérations connues et maîtrisées. Dans la conception innovante, bien qu'il soit confronté à un problème inédit, le concepteur est relativement familier de la classe de problème traité et ne doit pas nécessairement élaborer de nouvelles stratégies. Le degré d'incertitude le plus important se retrouve dans la conception créative pour laquelle le concepteur ne peut mobiliser de connaissances spécifiques au cas traité, et doit donc inventer des stratégies propres pour résoudre le problème. L'architecture se situe dans ces deux dernières catégories⁴, selon qu'on s'adresse à de la conception « courante » (maisons d'habitation ou bâtiments de bureau habituels, mobilisant des savoirs relativement maîtrisés) ou à des bâtiments dits « innovants » (par leur forme, leur technologie ou leurs techniques de construction). Cette dernière catégorie est d'ailleurs souvent réservée à un nombre très limité d'agences d'architecture.

La temporalité peut aussi définir la conception. Ainsi, en son sein, on distingue souvent la conception préliminaire ou créative de la production. La conception vue au sens large peut aussi

⁴ A l'exception du cas particulier des bâtiments « clé en main », qui ne nécessitent que des ajustements de configuration avant leur construction. Considérant qu'il s'agit d'un cas particulier en architecture, nous ne nous adresserons pas à ce domaine dans ce travail.

englober toutes les étapes jusqu'à la réalisation de l'objet. Cependant, pour certains auteurs comme Rabardel (Rabardel, 1995, Folcher & Rabardel, 2004) la conception d'un artefact, une fois construit, continue dans son usage par les utilisateurs⁵. Si d'une manière générale nous souscrivons à ce point de vue, extrêmement intéressant en ergonomie de produit et en ergonomie logicielle, qui consiste à réintégrer une dimension humaine et d'usage dans la façon d'appréhender les activités humaines outillées, nous adoptons néanmoins, dans le cadre de ce travail, une vision assez stricte de la conception. Ainsi, comme le montre la figure 1, nous introduisons dans notre réflexion une distinction entre la conception, qui consiste à définir les éléments principaux du bâtiment, et la production, dont l'objectif principal est d'optimiser le bâtiment et de produire les plans nécessaires à sa réalisation. Cette distinction n'est pas toujours opérée dans les études sur la conception. Nous considérons néanmoins qu'elle est essentielle dans la mesure où l'objet de ces activités de conception ou de production, les processus cognitifs mobilisés, les représentations créées et les instruments utilisés sont de nature différente.

Il est aussi à noter que l'éventail des technologies émergentes innovantes (voir Oxman, 2006) fait que nous devons établir une distinction supplémentaire : nos travaux d'aide à la conception s'inscrivent dans l'architecture courante. C'est ainsi que nous excluons de notre réflexion les cas particuliers des grands architectes comme Frank Ghery, Santiago Calatrava ou encore Jean Nouvel, qui développent leurs propres outils et leurs propres méthodes pour soutenir des projets d'architecture non conventionnelle.

En résumé, ce travail se centrera sur la conception préliminaire dans le domaine de l'architecture, que nous définissons comme **l'ensemble des activités cognitives et graphiques d'un individu ou d'un groupe d'individus, visant la composition originale et créative des éléments principaux d'un bâtiment à édifier ou à rénover et sa validation géométrique initiale, prenant en compte de nombreuses contraintes techniques, esthétiques, fonctionnelles ou culturelles, dans le but d'aboutir à des premières représentations de ce bâtiment, qui serviront de base à l'affinement du concept, son optimisation et sa validation complète.**

Cette définition insiste sur :

- les activités cognitives mobilisées ;
- le caractère créatif de la conception ;
- la production de représentations externes ;
- la description et la validation initiales d'un bâtiment dans son intégralité ;
- le caractère non fini de la conception préliminaire ;
- la gestion de contraintes d'ordres différents ;
- le caractère individuel ou collectif de la conception.

⁵ En effet, pour ces auteurs, la notion d'instrument possède une composante matérielle, l'outil à proprement parler, et une composante d'usage, des schèmes d'action. Ceux-ci sont construits à mesure que les utilisateurs s'approprient l'objet. De nombreux outils sont ainsi utilisés pour d'autres fonctions et avec d'autres modes d'utilisation que ce pour quoi ils ont été conçus. Par exemple, le manche d'un tournevis peut être utilisé pour enfoncer un clou, un téléphone portable pourra servir de montre, un post-it de cure-dents, etc. Dans le domaine de l'architecture, les appropriations et personnalisations de l'espace sont fréquentes, notamment pour marquer une forme de territorialité.

3. Problématique d'assistance

La problématique à laquelle nous nous adressons est relative à l'aide à la conception architecturale préliminaire telle que définie ci-dessus. La plupart des étapes du projet sont puissamment outillées par de nombreux logiciels, alors que l'étape de conception créative est paradoxalement toujours caractérisée, pour la plupart des architectes, par un travail d'esquisse sur papier. Or, l'essentiel des idées qui structurent la construction d'un bâtiment, mais aussi les éventuelles erreurs, se retrouvent déjà dans cette étape préliminaire (Juchmes, Leclercq & Azar, 2004).

En effet, on constate une prolifération des outils commerciaux ou prototypes de recherche visant à aider le dessin de plans techniques (AutoCAD, ArchiCAD ou AllPlan dans le domaine de l'architecture ou ProEngineer pour l'ingénierie). Ces outils ont d'ailleurs entièrement supplanté la table à dessin dans les cabinets d'architecture, grâce à leur efficacité en termes de possibilités de représentations, à leurs nombreuses fonctions d'édition et au caractère numérique de ces plans, qui facilite le partage, la communication et l'archivage. Mais, si ces outils sont puissants pour les phases aval du projet, ils peinent à supporter le travail créatif de la conception et ce, malgré leur appellation générale d'outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur), ou CAD (Computer-Assisted Design)⁶. Ces limitations, sur lesquelles nous reviendrons, portent principalement sur leur complexité d'utilisation, leur aspect strictement déclaratif et le manque de liberté qu'ils permettent dans la représentations de l'objet architectural.

En réponse à ces limites, de nombreux projets de recherche et de développement visent à utiliser la modalité graphique spontanée qu'est le dessin à main levée pour aider à soutenir la conception, créant ainsi des environnements d'esquisse numérique poursuivant différents objectifs. Ceux-ci permettent d'agir dans un monde numérique à l'aide d'un stylo électronique et de dessins virtuels. Alors que ces outils prolifèrent, essentiellement dans les milieux de la recherche, rares sont les études qui ont investigué de manière approfondie l'utilisation réelle de ces technologies et leur impact sur l'activité cognitive de conception. Notre travail vise à comprendre l'intérêt et les limites de cette mode de représentation et d'interaction dans les activités cognitives complexes que sont les activités de conception architecturale.

4. Contexte de ce travail

Depuis une dizaine d'années, les travaux du Laboratoire LUCID visent à soutenir l'activité de préconception en architecture. Le laboratoire a pris le parti de tenter de conserver la souplesse de cet outil naturel qu'est le crayon, sorte de prolongement de la main, tout en profitant des potentialités offertes par l'outil informatique en amenant, très tôt dans le processus, des aides à la conception adaptées à ces phases précoces. De cette réflexion sont nés plusieurs prototypes logiciels basés sur l'interaction au stylo.

⁶ A ce titre, notons que l'appellation CAD recouvre deux réalités : le « computer-assisted design » consiste en des outils d'assistance à la conception (CAO en français), proposant des simulations de performances du produit ou d'aide à la génération de la solution, alors que le « computer-assisted drafting » comprend les outils de dessin de plan (DAO - dessin assisté par ordinateur). Ces derniers ne possèdent aucune « intelligence » et permettent juste de remplacer les instruments traditionnels de dessins techniques. Néanmoins, ces deux types d'outils possèdent les mêmes problèmes d'interaction.

Ainsi, le LUCID est un des acteurs de la recherche les plus actifs dans le domaine de l'esquisse numérique, particulièrement pour l'architecture.

L'implication d'un ergonomiste dans l'équipe avait pour objectif de pousser plus loin les réflexions liées aux usages de ces dispositifs d'esquisse numérique. Ce travail est l'aboutissement de plusieurs années de recherche et de développement. Ainsi, fort de nos expériences de terrain et de nos connaissances du domaine, mais grâce aussi à des démarches de recherche structurées, nous interrogeons dans ce travail le rôle, les contraintes et les opportunités de l'esquisse numérique comme mode d'externalisation de la pensée et comme vecteur de soutien à la conception dans les phases précoces de la conception architecturale.

Ce travail poursuit donc plusieurs objectifs complémentaires.

- Un objectif fondamental, dans le champ de la psychologie cognitive, visant à mieux comprendre les processus de création de représentations externes et l'impact des médias de représentation sur les processus cognitifs, appliqués ici au champs de l'esquisse numérique et de la conception architecturale.
- Un deuxième objectif fondamental situé dans le domaine de l'interaction homme-machine, qui vise à comprendre les spécificités du stylo électronique et du dessin numérique comme modes d'interaction avec des environnements informatiques.
- Un objectif de capitalisation de connaissance visant à investiguer la conception architecturale en adoptant un point de vue externaliste, en nous focalisant sur le rapport entre le sujet et ses modes d'expression et de communication. Cette capitalisation des connaissances est un enjeu essentiel de l'ergonomie : fournir une base de situations sur lesquelles les praticiens ou chercheurs peuvent se reposer pour appréhender des situations nouvelles.
- Un objectif appliqué, visant à proposer des recommandations pour la conception d'interfaces-esquisses.
- Et un objectif de développement, visant à participer à la définition des environnements conçus et produits au laboratoire LUCID.

5. Structure du document

La première partie de ce travail consistera à positionner la thématique et à définir les concepts importants. Dans les prochaines sections, nous présentons une revue de la littérature découpée en quatre points : (1) la cognition externe, (2) les activités cognitives en conception, (3) les représentations externes en conception architecturale, (4) la conception collaborative et (5) l'esquisse numérique.

Nous situerons dans un premier temps notre approche en abordant le rôle des représentations externes dans les activités cognitives finalisées. Nous aborderons un point de vue externaliste sur la cognition, c'est-à-dire que nous décrirons les activités cognitives comme mobilisant une interaction forte entre des ressources internes à l'individu (schèmes, processus cognitifs, etc.) et des ressources externes (outils et représentations).

Nous situerons ensuite les activités que nous étudions, à savoir la pré-conception architecturale, par rapport au projet architectural et à l'activité de conception prise dans son acception la plus générale. Pour ce faire, nous synthétiserons les principales avancées dans le domaine, en

abordant les activités cognitives de la conception, largement documentées dans la littérature en ergonomie et dans le champ du *design cognition*, afin de positionner la conception architecturale en tant qu'activité externaliste.

Fort de cette mise en contexte, nous aborderons alors spécifiquement les aspects instrumentaux et représentationnels de la conception architecturale, et situerons particulièrement le rôle prépondérant de l'esquisse à main levée dans la pensée créative.

Nous aborderons ensuite les spécificités de la collaboration en conception et en architecture, les grandes activités mobilisées dans la conception et détaillerons le rôle que les représentations intermédiaires de conception et les annotations tiennent dans ces processus.

La section suivante aura pour objectif de dresser un état des lieux des recherches sur l'esquisse numérique. Nous proposerons une classification des systèmes d'esquisse en fonction de leurs objectifs, nous dresserons la liste de leurs atouts, identifierons les questions qu'elles soulèvent et aborderons également les lacunes de ces recherches qui se situent principalement dans le champ de l'intelligence artificielle, de l'interaction homme-machine et du *design computing*.

Nous décrirons dans une section spécifique le contexte de développement et les objectifs de trois environnements d'esquisse numérique pour l'architecture développés au LUCID, auxquels nous avons contribué, à savoir (1) le Bureau Virtuel de conception, environnement matériel de dessin numérique ; (2) le logiciel EsQUIsE, interpréteur de croquis d'architecture générant, sur base d'esquisses numériques, un modèle 3D du bâtiment en cours de conception ; et (3) le logiciel SketSha, logiciel de partage de dessins numériques à distance et en temps réel.

Nous dresserons ensuite la liste des questions que pose l'insertion de ces outils dans des pratiques de conception. Ces questions seront structurées autour de trois hypothèses, relatives aux contraintes et opportunités de ce mode d'externalisation pour la conception. Nous positionnerons aussi le cadre méthodologique dans lequel nous nous situons pour tenter de mettre à l'épreuve ces hypothèses.

Nous décrirons ensuite les trois études que nous avons menées pour tenter de répondre à ces questions. Pour chacune d'elles, nous positionnerons les questions et hypothèses spécifiques, nous décrirons les méthodologies utilisées, nous détaillerons nos observations et nous discuterons des résultats. Ces trois études d'usage sont basées sur l'observation d'étudiants dans le cadre d'exercices de conception. Elles cherchent toutes trois à comprendre l'usage spontané de l'esquisse numérique et à identifier les contraintes et opportunités sur l'activité, engendrées par ces dispositifs.

La première étude vise à explorer l'utilisation spontanée du logiciel EsQUIsE et le rôle de la 3D dans l'activité de conception créative individuelle. Par une approche descriptive et comparative, nous analysons l'impact de l'environnement numérique et de la représentation auto-générée sur l'activité de conception et sur les propriétés graphiques des dessins.

La seconde étude vise à étendre ces résultats, grâce à la comparaison de trois situations de conception (avec des outils traditionnels et sur environnement informatique avec ou sans interprétation de croquis). Nous cherchons à comprendre quels impacts sont induits par les spécificités du croquis numérique d'une part, et par son interprétation par un agent logiciel d'autre part. Outre l'organisation de l'activité et les propriétés graphiques des esquisses, nous étudions

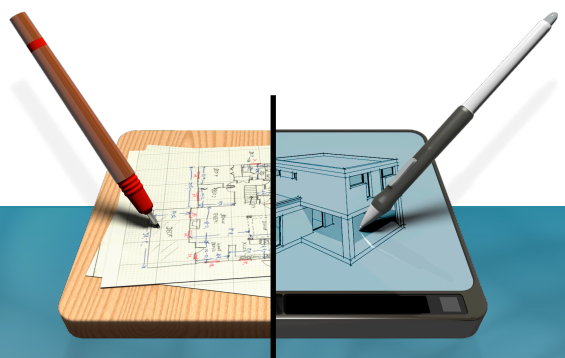
l'activité de mise au net de dessins, particulièrement impactée par l'environnement et peu étudiée en tant que telle dans la littérature.

La troisième étude cherche à comprendre le rôle de l'esquisse en tant qu'outil de communication à distance. Pour ce faire, nous observons un atelier de conception collaborative à distance, outillé par un dispositif multimodal de réunions synchrones, permettant aux utilisateurs d'importer des documents et de les annoter grâce à un stylo électronique. C'est cette modalité graphique de communication en conception qui nous intéresse ici. Nous effectuons une classification de toutes les productions graphiques échangées par trois groupes d'étudiants, situons le rôle particulier de l'esquisse numérique dans les échanges, analysons les pratiques d'annotation numérique à main levée et mettons ces observations en lien avec la qualité de la collaboration observée dans les groupes.

La dernière section de ce travail synthétisera les résultats principaux de ces trois études et les discutera dans une perspective globale. Elle aboutira d'une part à l'identification des principaux apports de ce travail dans le domaine de l'interaction-croquis et dans celui de la conception et, d'autre part, à des recommandations pour la conception d'environnements d'esquisses numériques.

CHAPITRE 2

Etat de l'art



1. La cognition externe

Un élément essentiel de la cognition en conception est l'usage des dessins, figures, plans, annotations et, plus globalement, de « représentations externes ». L'activité cognitive de conception est interne et externe à la pensée du concepteur : ce dernier élabore aussi bien des représentations mentales que physiques de l'objet architectural. Dans cette section, nous empruntons à la psychologie cognitive certains concepts en vue d'illustrer la manière dont les individus externalisent une partie de leur activité cognitive. Nous identifions ainsi quatre grandes fonctions des représentations externes dans les activités cognitives.

Cette mise au point nous permettra ensuite d'aborder spécifiquement les activités cognitives mobilisées pour la conception, avant de décrire spécifiquement le rôle des représentations externes en architecture, et en particulier celui de l'esquisse papier-crayon.

Il convient tout d'abord de spécifier clairement ce que nous entendons par représentation interne et externe. Pour distinguer ces deux aspects, nous pouvons adopter des définitions simples mais efficaces : une représentation externe est un objet physique contenant une information et une représentation interne est une structure cohérente d'information propre à un individu.

Dans la suite de ce document, nous utiliserons les termes suivants.

- Les « représentations externes » consistent en l'ensemble des possibilités de figuration d'informations (en l'occurrence de l'objet architectural). Afin d'alléger le document, sans précision contraire, le terme de « représentation » devra être compris comme une « représentation externe ».
- Le terme « document » se référera à tout type de représentation utilisée dans le cadre de la conception, qu'il s'agisse d'un plan, d'un texte, d'une photo, d'un modèle 3D, etc.
- Le terme « dessin » évoquera des productions graphiques en 2D produites par un concepteur, comme les plans ou les dessins à main levée.
- Nous utiliserons indifféremment les termes « croquis » ou « esquisse » en référence aux productions graphiques à main levée.
- Le terme « annotation », sauf précision contraire, sera utilisé pour décrire des croquis ou notes superposés à des représentations préexistantes.

Ainsi, les dessins effectués avec des interfaces à stylo seront qualifiés de croquis numériques ou esquisses numériques, et les ajouts d'information sur un document, par voie de logiciel, pourront être qualifiés d'annotations numériques.

1.1. Modèles de la cognition externe

Actuellement, il est assez largement reconnu dans les domaines de la psychologie cognitive et de l'ergonomie que l'activité mentale, la cognition, interagit constamment avec l'environnement dans laquelle elle s'inscrit. Ainsi, pour penser, l'être humain utilise un certain nombre de ressources extérieures à l'enveloppe stricte de son cerveau. D'une part, beaucoup d'activités expertes ou de la vie quotidienne sont instrumentées et mobilisent des outils qui rendent la tâche possible ou plus simple. D'autre part, autant d'activités font appel à des représentations externes, c'est-à-dire à des

informations structurées sur des supports extérieurs à la pensée. La liste de courses, le croquis explicatif, le dessin technique, les figures, schémas, diagrammes, animations ou encore simulations dans des espaces virtuels sont autant de supports à l'activité cognitive.

Pour appréhender le rôle crucial de ces représentations externes, il convient de sortir des cadres et théories classiques de la cognition humaine, considérant la cognition comme un système de traitement de l'information (tel que décrite notamment par les travaux fondateurs de Hebert Simon, voir Visser, 2006 pour une revue complète) où l'activité mentale est strictement circonscrite aux limites du cerveau et où l'interaction avec le monde extérieur s'opère via des *inputs* et *outputs*. Pour comprendre de manière plus fine les interactions entre l'homme et ces représentations externes, il nous apparaît nécessaire d'adopter une vue plus systémique de la cognition.

Plusieurs cadres théoriques ont tenté d'appréhender le rôle de l'environnement dans les activités humaines.

Vygotski, dans le cadre de la théorie de l'activité, est un des précurseurs de l'identification du rôle essentiel des outils en tant que médiateurs de la pensée. Dans des développements plus récents, Rabardel (Rabardel, 1995, Folcher & Rabardel, 2004) décrit les activités instrumentées dans un rapport complexe entre l'individu et les outils qu'il mobilise pour effectuer une action. Les instruments sont, dans ce modèle, constitués d'une composante d'usage (des schèmes d'action) et d'une composante matérielle (l'outil). Cette dernière est elle-même porteuse d'une signification construite culturellement. C'est ainsi qu'on peut observer deux types de genèse instrumentale. La première, locale, consiste en l'appropriation de l'outil par l'humain, son éventuel détournement et le développement ou l'adaptation des schèmes d'action appropriées à son utilisation. Par ce processus, l'outil devient une ressource pour l'action, l'artefact devient instrument. Le second mode de genèse instrumental est global et culturel. Ainsi, l'outil porte en lui des connaissances construites collectivement et culturellement, une capitalisation de l'expérience de l'Humanité.

Le paradigme de la cognition située (voir Suchman, 1987) considère que toute activité humaine émerge de la relation d'un individu à une situation. Il n'est donc pas possible de déterminer *a priori* les conditions, buts et éléments constitutifs de l'action. Les plans d'actions sont plus contextuels que rationnels et anticipés. Ils sont des guides et des moyens plus que des plans d'exécution prédéfinis et applicables en toutes circonstances (Quéré, 1997). Les activités dans les situations concrètes sont contraintes, guidées, voire déterminées par des éléments de la situation (les contextes physiques et sociaux). Par rapport à la vision de la cognition comme un système de traitement de l'information, ce courant nous semble pêcher par l'excès inverse, prônant un rôle extrêmement déterministe de la situation sur l'action.

D'autres auteurs, dans la lignée de la « cognition distribuée », (Hutchins, 1995 ; Zhang & Norman, 1994) ou de la « cognition externe » (Scaife & Rogers, 1996), considèrent un point de vue plus étendu de la pensée humaine. Ils tentent de comprendre les rapports complexes qu'entretiennent les êtres humains avec leurs outils, leurs documents et le monde qui les entoure. D'une manière générale, ces paradigmes systémiques de la pensée humaine décrivent l'activité cognitive comme répartie entre des humains, des artefacts, des communautés, des espaces et des représentations. Dans ce cadre, il est reconnu que la cognition se déroule là où il est moins coûteux de la faire fonctionner, parfois hors de l'esprit et du corps (Kirsh, 2010). Les représentations externes sont des compléments aux activités internes. Ainsi, ces cadres invitent à comprendre le rôle spécifique des représentations externes : leurs bénéfices cognitifs, leurs propriétés structurelles et les mécanismes de traitement et d'utilisation de ces représentations (Scaife & Rogers, 1996).

Ce point de vue nous apparaît essentiel à l'aire de la révolution numérique : il est désormais difficilement concevable de considérer la pensée comme découplée des systèmes d'informations

avec lesquels elle interagit. Nos habitudes de vie, inscrites dans la vie quotidienne ou dans des activités spécialisées, sont intrinsèquement liées aux nouveaux outils qui nous entourent, aux nouveaux médias de transmission de l'information et à la nature même de ces informations, en perpétuel changement. Le Web 2.0, les *smartphones* et la généralisation des interfaces tactiles ne sont que quelques exemples récents des bouleversements de notre rapport à l'information, et donc de nos activités cognitives. Les interfaces gestuelles, la réalité augmentée, la télévision interactive en constituent vraisemblablement les prochaines étapes. Nous pensons dès lors que l'étude de la cognition doit être effectuée en adoptant un regard systémique sur l'activité, englobant les systèmes et les modes d'information et d'interaction.

1.2. Rôles cognitifs des représentations externes

Les représentations externes possèdent plusieurs fonctions cognitives. Si leur rôle premier est évidemment de fournir une aide mnémotique, elles exercent aussi bien d'autres fonctions. On peut s'interroger sur les raisons qui poussent les individus à utiliser des notes, des schémas ou des dessins, pour des activités qui n'en nécessitent pas toujours *a priori*. Le calcul écrit en est un bon exemple : alors que la plupart des opérations peuvent être réalisées mentalement, quelles sont les raisons qui nous poussent à prendre des notes pour effectuer certaines opérations arithmétiques ? D'une manière générale, les représentations externes permettent d'améliorer l'efficacité et l'efficacité des activités cognitives (Kirsh, 2010). Par exemple, si la liste de courses a évidemment pour but de se souvenir des achats à effectuer, elle permet aussi à certaines personnes d'organiser leur stratégie d'achat, en définissant des parcours qui ne sont pas nécessairement aisés à récupérer en mémoire. Un agenda peut être utilisé de multiples façons, par exemple en structurant temporellement des informations non temporelles ou générales, comme des numéros de téléphone indiqués dans des plages horaires précises.

Nous passons ici en revue les rôles cognitifs des représentations externes dans les activités humaines, que nous pouvons regrouper en quatre catégories : alléger la charge mentale, structurer le comportement, matérialiser l'information et étendre la cognition.

1.2.1. Alléger la charge mentale

Une des fonctions les plus visibles et évidentes des représentations externes est l'allègement de la charge mnésique en cours d'activité. Les informations présentes sur une représentation externe ne doivent pas nécessairement être maintenues dans la mémoire de travail pour être manipulées. Elles peuvent être perçues et traitées directement. Les informations présentes sur des représentations externes ne sont pas déformées par le temps et n'ont virtuellement aucune limite en quantité.

Mais l'allègement de la charge mentale est bien plus important que cette simple réduction de charge mnésique. Zhang (Zhang, 2000, 1997 ; Zhang & Norman, 1994) considère que, dans la résolution de problèmes, le traitement de l'information est réparti entre des structures internes et externes. Chaque problème comprend un « espace représentationnel distribué », correspondant à la structure abstraite de la tâche et composé de représentations internes et externes. Les premières activent des opérations cognitives (comme du calcul mental) et mobilisent des informations stockées en mémoire alors que les secondes activent des opérations perceptives (comme la recherche de *patterns* visuels) et utilisent des informations directement perceptibles de l'environnement.

Ce traitement perceptif des représentations externes fournit un avantage certain, car les jugements perceptifs sont faciles, rapides et ils libèrent de la place pour des raisonnements logiques complexes (Cox, 1999). En effet, la mémoire de travail est composée d'un administrateur central (*central executive*) qui prend en charge les opérations de haut niveau et coordonne les actions de deux systèmes esclaves : le calepin visuo-spatial (*visuospatial sketch pad*) pour traiter et maintenir en mémoire les informations visuelles et la boucle phonologique (*phonological loop*) pour les informations verbales (Baddeley, 1992). Dans les représentations externes graphiques, l'information étant organisée spatialement, elle peut être traitée spécifiquement dans la mémoire de travail : le traitement et la rétention de l'information mobilisent le calepin visuo-spatial, ce qui libère les ressources de la boucle phonologique (Cox, 1999). Il est ainsi plus simple par exemple d'épeler un mot compliqué si celui-ci est présent sous forme textuelle. Cette représentation externalisée permet un accès direct à l'information spatiale (Goldschmidt, 1991).

Zhang & Norman (1994) ont montré l'intérêt de la matérialisation d'activités cognitives dans la résolution de problèmes, en prenant le cas de la tour de Hanoï. Dans cet exercice, il s'agit de déplacer des objets d'un espace à un autre pour passer de l'état initial à l'état final, en respectant trois règles.

- Règle 1 - Un seul objet peut être déplacé à la fois.
- Règle 2 - Un objet ne peut être placé que dans un espace où il sera le plus grand.
- Règle 3 - Seul l'objet le plus grand peut être déplacé.

Ils proposent trois dispositifs : avec des oranges, des donuts (instrument classique du problème de la tour de Hanoï) et des tasses de café (voir figure 10). Ces trois dispositifs possèdent la même structure, mais sont incarnés par des objets différents, ce qui modifie la structure représentationnelle des règles du jeu.




		Règle 1	Règle 2	Règle 3
Oranges		Interne	Interne	Interne
Donuts		Interne	Interne	Externe
Tasses		Interne	Externe	Externe

Figure 10

Trois représentations isomorphes du problème de la tour de Hanoï (tiré de Zhang, 2000).

Avec les oranges, les trois règles doivent être intériorisées : la structure des objets ne contraint pas le problème. Avec les donuts, la règle 3 est externalisée. Il n'est en effet pas possible de déplacer un autre objet que le plus grand, c'est-à-dire celui au-dessus de la pile. Avec les tasses de café, la deuxième règle est aussi externalisée : il n'est pas possible de poser une tasse sur une plus grande, à moins de renverser le café. Ainsi, il y a une hiérarchie dans le degré d'externalisation des règles du problème : Tasses > Donuts > Oranges. Leurs expérimentations ont montré que plus les règles étaient présentes dans les structures externes, plus les sujets étaient rapides et efficaces (nombre d'étapes requis) pour résoudre le problème et moins ils commettaient d'erreurs.

De l'exemple ci-dessus, les auteurs concluent que les représentations externes fournissent de l'information qui peut être directement perçue et utilisée sans être interprétée et formulée explicitement. En outre, elles ancrent et structurent le comportement cognitif, en diminuant l'étendue de l'espace-problème : certaines règles faisant partie de l'environnement, elles ne font pas partie de l'étendue de la réflexion possible d'un individu. Enfin, elles changent la structure même de la tâche, ici en la simplifiant. D'un point de vue subjectif, les tâches sont très différentes alors que leur structure abstraite est identique.

Les mêmes auteurs ont aussi montré que les différents systèmes numériques avaient un impact fort sur la difficulté des opérations de calcul. Par exemple, il est plus simple d'effectuer l'opération 79×23 que $DXXIX \times XXIII$, car la structure visuelle du système de numérotation arabe permet de manipuler plus facilement les chiffres que le système de numérotation romain.

Le traitement de l'information est donc réparti entre des représentations internes et externes. Ces représentations internes sont des structures cognitives sur lesquelles il est possible d'effectuer un traitement. Les représentations externes activent principalement des opérations perceptives, comme la recherche de *patterns* visuels, et les représentations internes principalement des opérations cognitives, comme le calcul mental (Zhang, 1997). Les informations contenues dans les représentations externes peuvent être prises, traitées et analysées par le système perceptif seul (Gibson, 1979). Les représentations externes possèdent certaines informations invariantes, qui permettent leur traitement perceptif direct, sans la médiation d'inférences ou de traitements cognitifs de haut niveau. C'est le cas de la symétrie par exemple, qui est directement perceptible sans devoir analyser en profondeur l'image perçue (Zhang, 1997). Mais les structures internes, comme les connaissances préalables, l'apprentissage ou certaines anticipations, peuvent faciliter, inhiber ou modifier ces processus perceptifs (Zhang, 2000). Selon Scaife & Rogers (1996), il est vraisemblable que les processus cognitifs faisant appel à des structures externes soient interactifs, complexes et impliquent des cycles, dans la perception des représentations mais aussi dans leurs utilisations (manipulation ou construction).

1.2.2. Structurer le comportement

Outre alléger la charge cognitive, les représentations externes peuvent véritablement structurer le comportement. La manière dont est présentée une information ou dont est conçu un objet conditionne grandement notre comportement. Le concept d'*affordance*, développé à l'origine par Gibson (1979), est largement utilisé dans le domaine de l'ergonomie de conception. Une *affordance* est une opportunité de comportement offerte par l'environnement envers un sujet. Ainsi, les caractéristiques physiques des objets peuvent nous inciter à adopter tel ou tel type de comportement. Par exemple, la forme d'une poignée de porte, selon son design, pourra nous inviter à la tirer ou la pousser. De mauvaises conceptions mèneront souvent à des confusions.

Les représentations externes ne sont donc pas uniquement des aides périphériques permettant de simplifier des processus. Elles occupent véritablement un rôle dans la cognition humaine. « *External representations are not simply inputs and stimuli to the internal mind ; rather, they are so intrinsic for many cognitive tasks that they guide, constrain, and even determine cognitive behavior* » (Zhang, 2000, p. 2).

Une expérience du même type que la précédente a été menée par Zhang (1997), sur un problème de tic-tac-toe. Le jeu original est constitué de 9 cases, dans lesquelles il faut positionner des pastilles à tour de rôle afin que 3 cases soient alignées. Zhang propose quatre isomorphismes de ce problème (figure 11). Le premier, la version classique du jeu, est basé sur une perception spatiale : pour gagner, il faut sélectionner trois cases alignées. Deux autres versions sont basées sur l'assemblage de formes ou de couleurs. Les sujets doivent tour à tour choisir une pastille comprenant plusieurs couleurs (ou formes). Pour remporter la partie, ils doivent sélectionner trois pastilles comprenant la même couleur (ou forme), sans qu'elles aient de position particulière dans l'espace. La dernière version est numérique : les pastilles comprennent un chiffre de 1 à 9 et il faut parvenir à une somme précise (le nombre 15) pour remporter la partie. Chacune de ces versions possède le même isomorphisme. Par exemple, la case du centre dans la version classique intervient dans quatre combinaisons différentes. Dans les autres versions elle est remplacée par une pastille comprenant quatre formes (intervenant donc dans quatre combinaisons) ou par le chiffre 5 (qui pourra aussi intervenir dans quatre combinaisons permettant d'obtenir le chiffre 15).

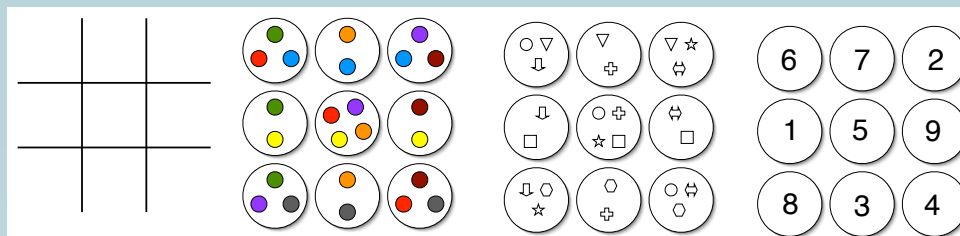


Figure 11

Quatre isomorphismes du problème de tic-tac-toe. De gauche à droite : la version spatiale classique, la version avec des couleurs, la version avec des formes et la version numérique. Pour plus de clarté, les pastilles des versions 2, 3 et 4 ont été ici positionnées spatialement de sorte à identifier facilement les différentes combinaisons gagnantes. Dans le cadre de l'expérimentation, les pastilles sont données sans agencement spatial particulier.

Ainsi, les informations nécessaires à la résolution de problèmes (identification des éléments, des trios gagnants et du nombre de combinaisons possibles avec chaque pastille) sont externalisées dans les trois premières versions et internes dans la quatrième. Cette dernière nécessite de la part des sujets un grand nombre d'inférences mentales (calculer les sommes, identifier les combinaisons, etc.).

L'auteur montre la complexité croissante de ces différents isomorphismes : plus le problème doit être internalisé, plus il est difficile. Mais cette étude met surtout en exergue des stratégies et des biais directement liés à la représentation du problème. Ainsi, il démontre qu'en fonction des isomorphismes du problème, les sujets utilisent deux stratégies.

- Dans les trois premières versions, la stratégie du « plus = meilleur » : les sujets sélectionnent prioritairement des jetons participant à un maximum de combinaisons.

- Dans la version numérique, la stratégie du « plus grand = meilleur » : les sujets sélectionnent en premier des grands chiffres. Cette stratégie constitue cependant un biais, n'étant pas optimale pour la victoire.

Ces stratégies sont observées dans les premiers essais des sujets et ce, qu'elles permettent ou non de mener à la victoire.

Hahn & Kim (1999) ont aussi montré, dans le champ de l'analyse et de la conception informatique, l'impact de différents formalismes d'un problème sur les comportements. Les sujets doivent analyser un problème décrit et concevoir un système informatique. Les résultats attestent que le type de représentation fourni au sujet modifie non seulement sa performance, mais aussi les stratégies mises en place et ce, à la fois pour des étapes d'analyse, c'est-à-dire d'interprétation, et des étapes de conception, c'est-à-dire de création.

Bien entendu, les outils à la disposition des personnes pour effectuer une tâche influenceront grandement ses modes de travail. Dans le domaine de l'architecture, une œuvre conçue à l'aide d'une équerre à 30 ou 45 degrés ne sera probablement pas du même acabi. Et l'utilisation d'outils informatiques permettant la symétrie aura aussi un impact à la fois sur le résultat et sur le processus, en permettant par exemple de réduire la complexité du problème en deux.

Un autre exemple, issu de l'architecture, montre qu'à partir de la même structure abstraite d'un exercice, suivant la forme qu'on lui attribue, le résultat sera bien différent.

La figure 12 montre le graphe de passages constituant le programme d'une habitation. Les figures 13 et 14 montrent deux déclinaisons de ce graphe de passages, fonctionnellement identiques mais formellement différents. En regard de chacun de ces graphes est positionné un plan issu d'une géométrisation de ce graphe.

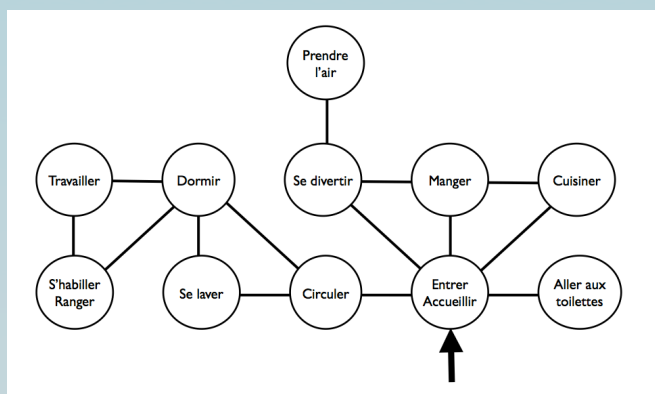


Figure 12

Graphe de passages représentant le programme initial de l'habitation.

Ici c'est donc bien la structure de la représentation externe du programme architectural qui influence fortement le comportement de conception et par conséquent le résultat.

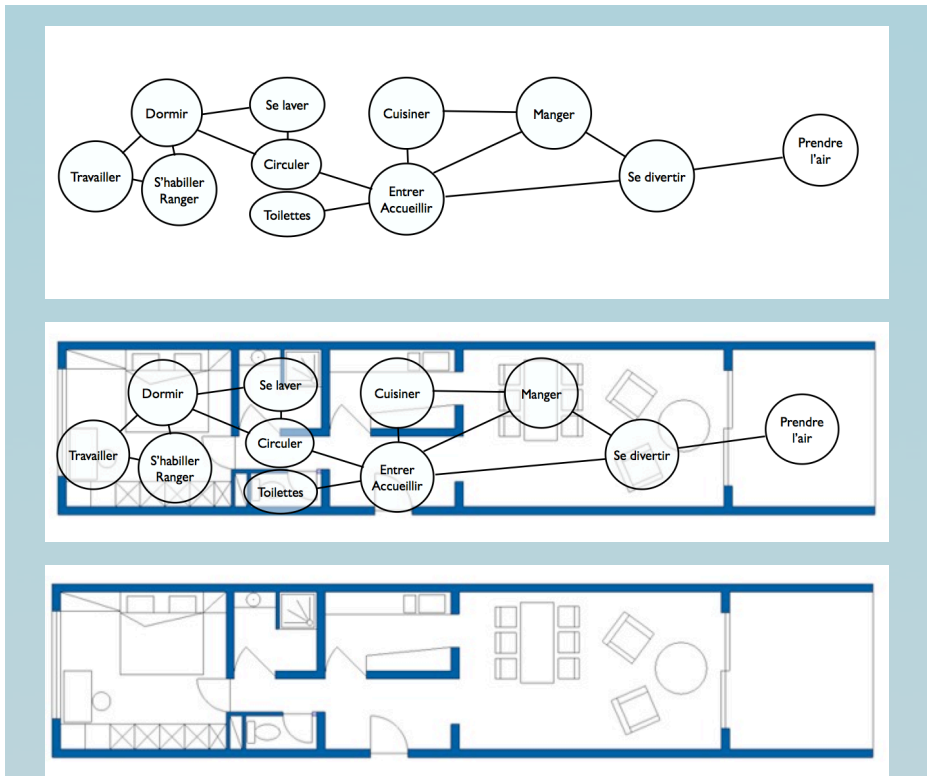


Figure 13
Première version du graphe de passages et du plan.

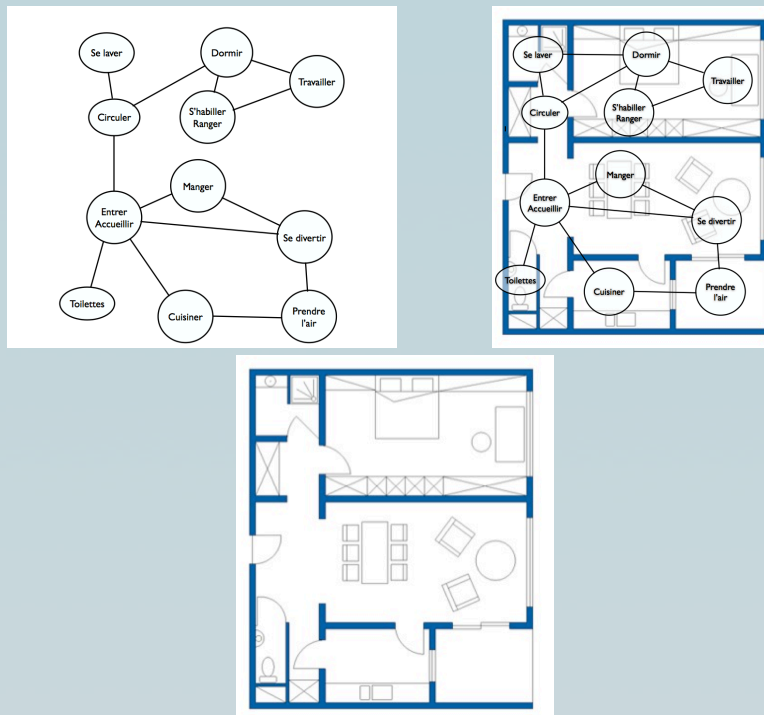


Figure 14
Seconde version du graphe de passages et du plan.

Ainsi, les éléments perceptifs externes ne permettent pas seulement de modifier la structure de la tâche, ils induisent aussi très clairement des comportements. Zhang (1997) parle même de « déterminisme représentationnel » : les représentations externes guident, contraignent voire déterminent le comportement cognitif. Différentes représentations de la même structure abstraite peuvent causer des comportements cognitifs radicalement différents. Pour sélectionner une action pertinente, les personnes vont se baser sur des anticipations de la situation (elles-mêmes basées sur des opérations perceptives et cognitives, et limitées par la charge cognitive qu'elles imposent), sur des apprentissages et de l'entraînement (qui permettent d'élaborer des stratégies pertinentes) et sur des biais perceptifs et cognitifs provenant de l'information directement perçue. Si le biais est cohérent avec la tâche, cela guidera les actions vers le but. Si c'est incohérent, cela pourra mener à des erreurs.

De la sorte, les *affordances* dépendent tant des propriétés de l'environnement que des caractéristiques de celui qui les perçoit. L'environnement et le sujet en action sont mutuellement contraignants et complémentaires.

1.2.3. Matérialiser l'information

Un intérêt majeur de l'existence de représentations externes est lié à la matérialité de l'information. Une fois l'information hors de la mémoire et de la stricte pensée des individus, elle devient *de facto* un objet tangible, manipulable, persistant et partageable. Cette matérialité engendre plusieurs conséquences.

D'une part, les représentations externes permettent d'ancrer le comportement cognitif (*cf. supra*) par l'addition d'un certain nombre de contraintes qui facilitent la cognition. Ces contraintes peuvent être physiques, comme dans l'exemple de la tour de Hanoï, mais aussi des indices visuels, qui aident à la réalisation d'inférences (Kirsh, 2010).

D'autre part, même si elles sont une projection de la pensée (dans le cas de représentations auto-construites), les représentations externes deviennent des objets extérieurs à cette pensée. Ainsi, elles permettent des réinterprétations et des reformulations. En effet, il est souvent plus facile de reformuler une idée extérieurement plutôt qu'intérieurement. Ces reformulations permettent aussi d'encoder plus facilement l'information en mémoire. Par exemple, tracer un schéma synthétique représentant un texte ou une idée est une forme de reformulation, visant à simplifier le message d'origine et à faciliter sa mémorisation. En outre, les représentations externes révèlent parfois des conséquences non anticipées et elles permettent d'« amorcer » des associations (phénomènes de *priming*). En observant une représentation, un ensemble de propriétés et de possibilités, parfois nouvelles, est directement accessible.

Créer une représentation externe c'est créer un objet persistant, mesurable, identifiable, utilisable dans des simulations et manipulable physiquement. La manipulation physique de l'information possède plusieurs propriétés complémentaires aux capacités de traitement interne (Kirsch, 2010).

- Elle garde une trace des opérations effectuées. Par exemple, un jeu de puzzle serait un exercice plus compliqué si ses pièces n'étaient pas manipulables. Leur persistance permet d'avancer pas à pas dans la résolution du problème. Néanmoins, en corollaire à cet avantage, les représentations externes ne comprennent pas de traces des changements lorsqu'elles sont modifiées. Il est cependant possible de garder des traces via des enregistrements ou la gestion des différentes versions de la représentation.
- Elle devient un objet indépendant de la cognition : l'addition d'opérations mentales à des systèmes complexes externalisés ne change pas leur état, à la différence des représentations internes. Celles-ci sont indéniablement altérées par tout traitement cognitif. La persistance des représentations externes permet d'assurer une certaine continuité de la cognition et des

pensées : il est plus facile d'avoir plusieurs fois une pensée similaire quand ces pensées sont ancrées dans des représentations identiques. La pérennité des représentations externes est aussi relativement fidèle : on peut considérer en toute confiance qu'une représentation externe n'a pas évolué entre deux utilisations. Ce n'est évidemment pas le cas des structures internes et de la mémoire.

- En tant qu'objet indépendant de la cognition, les représentations externes peuvent être utilisées à d'autres fins que celles pour lesquelles elles ont été conçues. Un croquis visant à soulager la mémoire pourra en retour devenir un stimulus à une réinterprétation (voir chapitre 2, point 3.3 pour la réinterprétation d'esquisses en architecture).
- La matérialité de l'information, sa persistance et sa répartition permettent des comparaisons plus directes ainsi que des réarrangements sur un mode spatial.
- La matérialité des représentations externes permet enfin de prouver la cohérence de ses composantes. Si les axiomes qu'elle mobilise sont incohérents, il est peu probable que la représentation soit matérialisable. Ce rôle de vérification de la cohérence de l'objet projeté est particulièrement fondamental en conception.

Cette matérialité rend également possible le partage de structures. En créant un objet partageable, avec soi ou d'autres, la représentation acquiert une (relative) indépendance vis-à-vis de son auteur et devient une part de la réalité extrinsèque à la pensée, à laquelle il est possible de se référer. Les représentations externes deviennent des objets de pensée partagés, publics et intersubjectifs (Kirsh, 2010). La représentation externe devient un objet intermédiaire dans la communication.

1.2.4. Etendre la cognition

Enfin, d'une manière générale, les représentations externes permettent aussi d'étendre la cognition. Avec l'aide de représentations, il est possible d'accéder à de nouveaux opérateurs, d'encoder des structures élaborées et de réaliser des opérations de plus grande complexité. L'utilisation du monde extérieur pour la computation externe est un moyen très puissant d'extension des capacités cognitives des individus. « ... *as our environments and technology change, we will be able to think about things that today are unthinkable* » (Kirsh, 2010, p. 2). L'écriture, par exemple, n'est pas seulement la transcription d'une forme auditive en forme visuelle. La transposition d'une idée sous forme textuelle permet un traitement collectif d'une part, et d'autre part l'application des raisonnements complexes via la pensée réflexive. L'externalisation de la pensée est donc un processus essentiel de la construction du savoir.

L'externalisation d'une information permet un traitement différent mais complémentaire du traitement possible en interne. En premier lieu, externaliser une information, c'est permettre d'utiliser des outils et artefacts plus puissants pour le traitement de cette information. Par exemple, l'utilisation d'une calculatrice s'avère dans beaucoup de cas bien plus puissante que le calcul mental. Ensuite, une représentation externe telle qu'un modèle peut être soumise à des simulations complexes, souvent impossibles à gérer mentalement. De plus, ces simulations peuvent être multipliées et contrôlées précisément, ce qui permet de comparer des choses qui seraient incomparables sans cette ressource externe.

Mais l'externalisation permet aussi des opérations cognitives très difficiles sinon impossibles sans support externe (Kirsh, 2010). Ces opérations peuvent être ardues par leur degré de complexité, comme la multiplication de nombres à quatre chiffres entre eux ou la rétention de dizaines de noms⁷, alors que d'autres le sont par leur nature. Ce sera notamment le cas de la superposition de

⁷ Bien qu'il ne soit pas possible prouver de manière absolue la limite de complexité des raisonnements cognitifs possibles, notamment car certains individus ont développé des capacités cognitives hors normes, on peut prédire que certaines opérations deviennent irréalisables mentalement à mesure que leur complexité augmente.

figures, du réarrangement spatial de certains éléments ou de la mesure, qui sont autant d'opérations qui nécessitent la présence de représentations externes pour pouvoir être effectuées. Ce sera aussi le cas des substitutions ou des comparaisons d'images. En outre, certaines formes d'informations ne peuvent exister qu'en dehors de l'esprit et sont donc extrêmement difficiles à se représenter mentalement. C'est le cas de la musique par exemple. Pour tous ces cas, la présence de représentations externes permet le traitement cognitif.

1.3. Liens entre les représentations internes et externes

Depuis toujours en philosophie et en psychologie, la notion de représentation interne (ou représentation mentale) est sujette à controverses et ambiguïtés. Nous la considérons ici sous une acception très générale : une structure de pensée permettant de signifier un signifiant qui peut être absent ou éloigné. Les représentations mentales possèdent différentes fonctions qu'elles partagent avec les représentations externes : conservation, explicitation, systématisation, symbolisation du signifié et guidage des actions (Denis, 1979, cité par Galina, 2006). Les représentations mentales sont spécifiquement dirigées vers des buts ou des actions, ce qui leur confère souvent un caractère incomplet et instable. C'est le concept d'image opérative (Ochanine 1978). Elles diffèrent des représentations externes par leur aspect subjectif et personnel, et par leur matérialisation évoquée au point précédent. Notre objectif n'est pas d'opérationnaliser ce concept de représentations internes : nous cherchons principalement dans ce travail à mettre en exergue le rôle des éléments externes à la pensée, afin de comprendre le substrat environnemental de l'activité cognitive. Les deux modes de représentations possèdent donc des propriétés et des utilités différentes. La façon dont les interactions entre les représentations internes et externes prennent place modifie les processus cognitifs impliqués dans l'activité. Les représentations externes incitent à parcourir visuellement leur contenu, activent des attentes et des associations, et sont traitées par le système perceptif. Les représentations internes activent des processus de traitement et le système mnésique. L'interaction entre les deux structures modifie aussi la permanence des informations. Les schémas, dessins et images ne déclinent pas avec le temps comme modèles mentaux.

Une représentation externe peut devenir interne par un processus de mémorisation et l'inverse se produit par des processus d'externalisation. L'être humain cherche toujours l'économie cognitive dans l'encodage et le retrait de l'information (Collins & Quillian, 1969).

La mémorisation explicite⁸ ne prendra généralement pas place quand la représentation externe est en permanence disponible, car cela n'est pas nécessaire (par exemple, nous ne mémorisons plus que très rarement les numéros de téléphone car, depuis l'apparition du téléphone portable, nous avons toujours ces informations sous la main), ou quand elle est trop complexe (Zhang, 2000). Les représentations externes ne doivent pas être re-représentées comme structures internes pour pouvoir être impliquées dans les activités cognitives (Zhang, 1997). Elles peuvent activer des opérations perceptives et directement fournir de l'information, qui peut être utilisée en conjonction avec les informations internes pour résoudre un problème ou effectuer une action. De même, si les informations contenues dans les représentations externes peuvent être prises, traitées et analysées par le système perceptif, des processus *top-down* peuvent faciliter ou inhiber le traitement (comme les structures de connaissances préalables). Si un modèle mental des représentations externes n'est pas nécessaire, cela ne veut pas dire que les représentations externes fonctionnent sans le support des opérations mentales ou qu'elles peuvent être utilisées sans interprétation ni contrôle par des mécanismes cognitifs de haut niveau (Zhang, 2000).

⁸ Il existe évidemment beaucoup de situations d'apprentissage ou de mémorisation implicites, qui peuvent accompagner la création ou l'usage de représentations externes. Ainsi, à force d'utiliser une information, elle pourra être mémorisée. Nous faisons ici référence aux phénomènes conscients et explicites de mémorisation.

L'externalisation n'est pas plus automatique ni systématique : elle ne sera effectuée que si le coût de cette externalisation est moins important que les bénéfices qui peuvent en être retirés (Zhang, 2000). Par exemple, on préférera maintenir en mémoire une liste de courses minimale plutôt que de l'inscrire sur papier.

L'externalisation est plus un processus de traduction que de transcription : il s'agit de transformer une information en mémoire vers le bon niveau d'abstraction (Cox, 1999). Le processus de dessin n'est pas la copie d'une image mentale : il n'y a pas nécessairement de correspondance projective entre l'image interne et celle qui est générée sur sa base. L'image créée est aussi en quelque sorte opérative : elle fournit un certain nombre d'informations utiles, sans chercher un réalisme ou une analogie avec ce qu'elle représente (Gibson, 1978, Scaife & Rogers, 1996). En ce sens, le terme même de représentation est controversé car il ne s'agit pas de représenter une information de manière similaire. Ainsi, les croquis de cartes géographiques ou d'itinéraires ne correspondent pas à la réalité, en ce sens qu'ils ajoutent, enlèvent ou déforment l'information pour rendre la représentation plus utile et opérationnelle (Tversky, 2002). A noter que lors de l'interprétation de la représentation, les informations manquantes ou ambiguës pourront être retrouvées en fonction du contexte.

Ainsi, selon Cox (1999), l'externalisation dans la résolution de problèmes remplit plusieurs fonctions :

- traduire l'information d'un type de représentation à un autre, ce qui permet d'utiliser les formalismes les plus adaptés, de favoriser les réinterprétations et de changer de mode de raisonnement. Les représentations externes permettent par exemple de faciliter l'inférence des mouvements ;
- vérifier l'information, car le processus d'externalisation nécessite de rendre explicite les informations implicites et les manques d'informations. Il s'agit aussi d'affiner et désambigüiser les images mentales ;
- exploiter à la fois la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial, les deux composantes complémentaires de la mémoire de travail (Baddeley, 1992). Cette double exploitation simultanée a pour intérêt de libérer des ressources dans chacun de ces sous-systèmes ;
- réordonner l'information de manière utile et l'organiser spatialement, pour faciliter son traitement en fournissant une assistance perceptive ;
- diriger son attention vers des parties irrésolues des problèmes et garder une trace de l'avancement du problème ;
- encourager et faciliter la *self-explanation*, qui consiste à s'expliquer à soi-même des concepts à retenir.

Tous ces processus sont fondamentaux dans la conception architecturale.

« *This interactive process of projecting structure then materializing it, is, in my opinion, one of the most fundamental processes of thought.* » (Kirsch, 2010, p. 5)

1.4. Efficacité des représentations externes

De nombreuses études ont cherché à comparer l'efficacité de plusieurs types de représentations externes. En effet, il en existe de nombreux types. Elles peuvent être graphiques, textuelles, figuratives ou abstraites, statiques ou interactives, etc. De plus, avec la généralisation des systèmes informatiques et l'accroissement de leur interactivité, il devient parfois difficile de marquer la frontière entre la représentation d'une information et un outil de traitement de cette information. En parallèle, le nombre croissant de dispositifs d'informations électroniques rend nécessaire de comprendre quelles sont les façons les plus efficaces de représenter une

information donnée. Il est communément admis que des représentations différentes d'une même structure abstraite ont une efficacité inégale quant à leur capacité de simplification de tâches et d'expressivité (« effet représentationnel », Zhang, 2000). Bien que les études sur le sujet soient morcelées (Scaife & Rogers, 1996), plusieurs variables permettent de qualifier l'efficacité des représentations externes : celles liées à la représentation et celles liées à l'individu.

Les premières études visant spécifiquement à étudier l'efficacité des représentations externes sont celles de Larkin et Simon en 1987 et celle de Bauer & Johnson-Laird en 1993 (toutes deux citées par Scaife & Rogers, 1996) qui montrent la supériorité des représentations graphiques sur les représentations sentencielles dans la résolution de problèmes finis. Pour Stenning & Oberlander (1995, cité par Cox, 1999), les représentations externes graphiques sont moins expressives que leur équivalent phrasé : elles laissent moins de place à l'interprétation et sont plus explicites, ce qui permet un meilleur traitement. Ils en concluent que l'idéal est d'avoir des représentations mixtes qui combinent graphiques et textes, afin de garder une souplesse tout en conservant un certain degré d'expression. Zhang & Norman (1995) ont établi une taxonomie de différents systèmes de numérotation (chiffres arabes, romains, grecs, etc.). Ils montrent ainsi que les différents systèmes numériques impliquent un plus ou moins grand nombre d'opérations mentales lors d'une multiplication, alors que dans d'autres systèmes, des informations sont directement perceptibles. Pour Cox (1999), l'efficacité informationnelle est moins importante que l'efficacité computationnelle dans les représentations externes : les bonnes représentations sont plus efficaces d'un point de vue computationnel que l'information qu'elles représentent. L'efficacité des représentations externes est donc intimement liée au type de tâches qu'elles soutiennent.

D'autre part, les connaissances antérieures (aussi bien sur la tâche que sur l'utilisation de tel ou tel type de représentation) et les facteurs individuels (style cognitif, préférences) influent aussi sur l'efficacité des représentations (Cox, 1999 ; Scaife & Rogers, 1996). En effet, l'utilisation de certains types de représentations externes n'est pas automatique et nécessite parfois certains apprentissages. Sans ces derniers, il est probable que certaines représentations n'évoquent rien pour les lecteurs. Ce sera le cas d'un plan d'architecture, difficile à lire pour un non initié. Une fois ces modes de représentations maîtrisés, elles peuvent activer des règles de lecture et donner des indices d'inférences pour permettre leur compréhension.

Il est aussi important de distinguer les représentations construites par l'individu de celles qu'il interprète et qui sont construites par d'autres. Les représentations « privées » sont moins coûteuses à produire mais, en corollaire, sont souvent moins complètes, partiellement externalisées et non labellisées.

Enfin, l'efficacité repose souvent sur l'utilisation de plusieurs représentations afin de raisonner séquentiellement ou conjointement (Cox, 1999). En architecture, l'utilisation de la transparence est très répandue pour manipuler et traiter plusieurs documents. Des représentations multiples sont utilisées pour leurs complémentarités (en termes d'informations qu'elles contiennent ou de processus computationnels qu'elles permettent), pour contraindre leurs interprétations mutuelles (par exemple utiliser une représentation familière pour faciliter l'interprétation d'une représentation moins familière) ou pour construire une compréhension plus profonde (en support à l'abstraction ou à la généralisation) (Ainsworth, 1999). Ces rôles ne sont, bien entendu, pas exclusifs.

Ainsi, Scaife & Rogers (1996) proposent plusieurs recommandations pour la conception de représentations graphiques sur des systèmes interactifs.

- Favoriser la visibilité et le caractère explicite des représentations. Il convient de sélectionner quels éléments doivent être saillants, compte tenu de la tâche, et quels « indices perceptuels » doivent être fournis.

- Proposer des représentations interactives qui peuvent supporter une fonction de « trace cognitive ». Les annotations ont ici un rôle intéressant à jouer.
- Préférer des représentations avec une certaine facilité de production : il est plus aisé de comprendre un diagramme quand on maîtrise sa construction.
- Combiner des types de représentations externes différentes.
- Permettre de partager pour aboutir à des représentations graphiques distribuées.

Synthèse

Cette section fait une synthèse des principaux concepts relatifs à ce que nous appelons « cognition externe ». Il s'agit du point de vue par lequel toute activité cognitive se déroule en interaction avec des éléments extérieurs au cadre strict de la personne : outils et surtout représentations externes.

Dans un premier temps, nous avons défini la notion de représentation externe. Nous avons ensuite synthétisé différents points de vue sur la cognition et son rapport avec le monde. Nous avons ensuite identifié quatre grandes fonctions des représentations externes dans les activités cognitives :

- *alléger la charge mentale, principalement en soulageant la mémoire et en permettant un traitement perceptif ;*
- *structurer le comportement, c'est-à-dire influencer voire en partie déterminer les stratégies et les modes d'action ;*
- *matérialiser l'information, ce qui permet de nombreux bénéfices comme l'indépendance de l'information à l'auteur, la persistance et la confrontation aux lois physiques du monde ;*
- *étendre la cognition, c'est-à-dire permettre des traitements cognitifs difficiles voire impossibles sans ces représentations externes.*

Nous avons ensuite évoqué les mécanismes qui sous-tendent le passage d'une représentation interne à une représentation externe et vice-versa. Nous concluons sur une réflexion sur l'efficacité des représentations en soutien aux activités cognitives.

Cette section adopte un point de vue général et introductif sur le rôle des représentations externes. Nous adopterons un point de vue plus ciblé, sur leur rôle dans l'activité de conception et principalement sur le rôle de l'esquisse, dans le point 3 du présent chapitre.

2. La conception d'un point de vue cognitif

2.1. Modèles de la conception

Les premiers modèles de la conception visaient à fournir des méthodes prescriptives, permettant de guider l'action du praticien. Leclercq (1994) en identifie plusieurs catégories, comme les modèles procéduraux, qui fournissent une procédure stricte et des étapes pour résoudre un problème de conception, ou les modèles par décomposition qui suggèrent d'analyser de manière exhaustive les différents composants du problème pour en dériver les éléments de conception. Ces modèles possèdent des forces et des faiblesses dans leur capacité à guider l'action du concepteur. Cependant, dans une optique d'ergonome, même s'il est évident que de tels modèles présentent un intérêt applicatif important, il est nécessaire d'étudier *l'activité* de conception. En effet, entre le modèle prescriptif et le déroulement de l'activité réelle s'opère le même décalage qu'entre la tâche et l'activité, décalage identifié depuis longtemps dans le domaine de l'ergonomie (Leplat & Hoc, 1983), et fondateur pour la discipline (Falzon, 2004). Dans de nombreux cas, les études empiriques de la conception attestent que les méthodes et modèles prescriptifs ne sont pas suivis en situation professionnelle (Stempfle & Badke-Schaub, 2002, Leclercq, 1994). Ainsi, les acteurs industriels ont bien plus de mal à encadrer et maîtriser, avec des méthodes formelles, les processus de conception que ceux de production (Darses, Détienne, & Visser, 2001).

Les premiers travaux sur la conception en tant qu'activité cognitive générale intervenant dans de nombreux domaines professionnels (informatique, mécanique, architecture, etc.) ont pris leur essor dans les années 70. Les travaux précurseurs considèrent la conception comme une activité de résolution de problèmes (Simon, 1969 ; voir Visser, 2006 pour une revue complète). Dans ce paradigme des systèmes de traitement de l'information symbolique, tout problème possède un état initial, un état final (solution) et un ensemble d'opérateurs permettant de passer d'un état à un autre par une série d'étapes. L'ensemble des possibilités et des états intermédiaires est représenté mentalement dans un « espace-problème » définissant les contraintes et possibilités des opérateurs pour la résolution de problèmes. Ainsi, les individus passent par une succession itérative de trois types d'activités cognitives : représentation de l'état du problème, génération de solutions et évaluation de la solution. La conception est considérée comme une résolution de problèmes, car, pour de nombreux éléments de la tâche, il est impossible de retrouver en mémoire des structures préétablies, et il est nécessaire pour le concepteur de construire de nouvelles procédures (Visser, 2009b).

Les tâches de conception, telles qu'étudiées dans cette approche, font partie d'une sous-catégorie particulière de problèmes, qui sont dits mal définis ou mal structurés (*ill-structured problems*, selon Simon, 1969). Ils partagent plusieurs propriétés invariantes (voir notamment Darses, 2004, Visser, 2006).

- Ils souffrent d'un manque de structuration : l'état initial, l'état final et les opérateurs ne sont pas univoques ni spécifiés. Les exigences et les contraintes ne sont pas stabilisées. L'état du problème n'est pas entièrement spécifié au préalable. La définition du problème, la construction de la solution et la mise au point de critères d'évaluation évoluent de manière interdépendante au cours de la résolution du problème. Ainsi, Visser (2001) propose de parler de couples problèmes-solutions.
- Les problèmes de conception sont généralement très larges et complexes, ce qui empêche leur décomposition en un nombre exhaustif de sous-problèmes indépendants.
- Il n'existe pas de procédure unifiée pour résoudre des problèmes de conception (Bonnardel, 1999). La résolution de ces problèmes fait appel à la réutilisation de connaissances et de

stratégies mobilisées dans d'autres problèmes antérieurs, mais nécessite aussi d'inventer de nouvelles méthodes.

- Il n'y a pas une solution unique et correcte à un problème de conception mais un ensemble de solutions potentielles plus ou moins pertinentes. La solution finale ne sera pas correcte ou incorrecte, mais constituera une solution « acceptable » parmi d'autres et le concepteur cherchera la solution la plus satisfaisante possible (Visser, 2001).
- L'évaluation en cours de conception est difficile : les critères sont variés (dictés par la tâche mais aussi par les préférences des concepteurs, Bonnardel, 1999), évolutifs et souvent ambigus. Les évaluations doivent se faire sur des simulations, maquettes ou prototypes. Ce qui provoque souvent le report des évaluations formelles en phase de production. Or, plus des remises en questions viennent tard dans le processus, plus elles sont coûteuses.

Il est à noter que, dans cette approche, la conception est un type de résolution de problèmes, et n'est donc pas nécessairement liée au statut socio-professionnel des acteurs. Le concepteur n'est pas uniquement l'architecte ou l'ingénieur. Est concepteur celui qui est confronté à ce type spécifique d'activité de résolution de problèmes (Visser, 2001, 2009b). En outre, la conception est vue ici comme une activité générique, indépendante du domaine d'application. L'intérêt principal de cette approche est qu'elle permet de généraliser l'étude de la conception et d'emprunter des concepts aux nombreuses études de la résolution de problèmes en laboratoire. La principale critique de cette approche est sa vision mécaniste et quelque peu réductrice. La conception, et la conception architecturale en particulier, sont des activités bien plus complexes que les résolutions de problèmes observables en laboratoire.

En réaction à cette vision « mentaliste » de la conception, certains auteurs, en particulier Schön (1983), ont insisté sur le caractère situé de la conception, décrite comme une activité émergeant d'une interaction riche avec un contexte particulier. Les connaissances mobilisées dans des situations de conception sont orientées vers l'action. La conception est vue comme une « conversation réflexive avec la situation », où la conception même devient un objet de réflexion. Selon Schön, la conception est caractérisée par des mouvements du type « voir-transformer-voir », c'est-à-dire que la situation est interprétée, qu'elle mobilise des savoirs orientés vers l'action (et pas systématiquement exprimables) et que toute action de transformation de la situation implique un nouveau processus d'interprétation. Ces actes de transformation et de réinterprétation engendrent des découvertes inattendues. Cette approche est résolument constructiviste : les savoirs et la situation se co-construisent et s'influencent mutuellement. Dans ce courant de pensée, nommé le situationnisme, l'idée de plans et de stratégies est rejetée : l'activité est opportuniste voire réactive, et les plans ne sont que des reconstructions *a posteriori* des activités en situation (Suchman, 1987)⁹. Dans la même veine, les théories interactionnistes issues des sciences du langage insistent sur le caractère situé, collaboratif et multimodal de la conception (Bruxelles, Greco, Mondada, & Traverso, 2009). Dans cette perspective, la conception émerge de la situation, fait toujours référence à d'autres individus et mobilise des processus de catégorisation élaborés pour permettre la prise de décision. L'intérêt de ce modèle est qu'il rend à la conception toutes ses spécificités et sa complexité. En corollaire, ces modèles sont peu généralisables et peu opérationnels dans une optique d'assistance à la conception.

Malgré une apparente opposition, ces deux approches de la conception, situées à deux extrêmes, possèdent une certaine complémentarité. Plus récemment, Visser (2006), dans une volonté de réconcilier ces deux courants, considère la conception comme une activité de construction de représentations. Le concepteur, pour créer l'artefact à concevoir, se base sur des représentations, qui sont internes et externes à sa pensée. L'activité de conception, selon Visser (2006, 2009) est une activité de modification de ces représentations. Le concepteur se construit, au cours de son

⁹ Darses (2004) souligne néanmoins à ce propos que l'importance des prescriptions et méthodes comme instrument de *guidage* des activités de conception a été largement démontrée en ergonomie cognitive. Le même constat est dressé par les spécialistes des méthodes de conception en Allemagne (Pahl *et al.*, 1999).

activité, des représentations mentales (percepts, modèles mentaux, etc.) de l'objet à concevoir tout en construisant des représentations externes de cet objet (plans, schémas, modèles, maquettes, textes, etc.). Ces mouvements de transformation tendent vers une spécification de plus en plus précise de l'artefact. Les représentations externes, appelées ici « objets intermédiaires de conception » tiennent une place centrale dans l'activité, en tant qu'espaces de simulation et supports à la pratique réflexive et de représentation des états intermédiaires de la solution.

Dans cette dernière perspective en particulier, la conception est une activité opportuniste (Visser, 2001), c'est-à-dire qu'elle n'est pas basée sur une planification hiérarchique du travail à accomplir (la planification étant entendue ici comme l'utilisation de représentations mentales dans le but d'organiser l'activité), mais que son organisation effective est largement dépendante de la situation et de son évolution.

Cette approche a le mérite d'emprunter les concepts pertinents des deux approches précédentes et de mettre en avant le rôle prépondérant des représentations externes pour la conception (plans, maquettes, dessins, modèles, etc. dans le domaine de l'architecture). C'est dans cette optique que nous nous situons.

2.2. Activités cognitives en conception

Il est classiquement reconnu que les activités de conception mobilisent trois grandes classes de processus cognitifs : la structuration du problème, la génération et l'évaluation des solutions. En outre, deux modes de pensée sont essentiels dans la conception créative (Bonnardel, 2009) : le raisonnement analogique et la gestion des contraintes. Nous passons en revue ces différentes notions dans les sections suivantes.

2.2.1. La construction d'une représentation mentale du problème (ou formulation du problème).

Schön (1983), distingue d'une part le *problem framing*, en d'autres termes l'analyse et la formulation du problème et, d'autre part, le *problem solving*, qui consiste en sa résolution. Cette formulation du problème n'est pas une phase en soi, mais une activité mise en œuvre de façon récurrente. Ainsi, pour se créer une représentation du problème, le concepteur le décompose en sous-entités¹⁰. Cette construction de la représentation du problème évolue au fil de la résolution de sous-problèmes précédents et de l'état de la (des) solution(s). Problèmes et solutions évoluent donc conjointement (Dorst & Cross, 2001) « "problème" et "solution" sont ainsi des notions relatives, deux faces d'une même entité » (Visser, 2001, p. 6).

Bien souvent en conception, le cahier des charges joue un rôle essentiel de structuration du problème : il est porteur de nombreuses contraintes, plus ou moins explicites, qui vont structurer l'activité cognitive de conception. Une contrainte peut être définie très largement comme une condition à satisfaire. Quand le problème est sous-spécifié, le concepteur établit spontanément les contraintes manquantes. Ainsi, il se crée délibérément un « environnement cognitif contraint » (Chevalier & Bonnardel, 2003) sur base du cahier des charges et des contraintes qu'il construit dans la situation. Cet environnement cognitif contraint permet, d'une part, d'élargir l'espace de recherche en proposant des solutions (génération) et, d'autre part, de réaliser des

¹⁰ cf. l'approche par décomposition d'Alexander (1971, cité par Leclercq, 1994) qui suggère que pour être résolu, un problème de conception peut être entièrement décomposé. L'auteur propose la notion de *design patterns* en tant que structure du problème, réutilisable pour le solutionner.

choix parmi ces solutions (évaluation). Les contraintes sont donc une base à la structuration du problème, elles permettent de guider la génération de solutions et servent comme référents pour l'évaluation de ces solutions.

Bonnardel (Bonnardel 1999, Chevalier & Bonnardel, 2003) distingue trois types de contraintes :

- les contraintes prescrites, dérivées du cahier des charges (par exemple, en architecture, les adjacences des différents locaux d'un bâtiment ou certaines surfaces) ;
- les contraintes déduites, dérivées de l'état du problème ou de la solution (par exemple les contraintes de structure dues à certains choix de conception) ;
- les contraintes construites, dépendantes de l'expertise ou des préférences du concepteur (typiquement l'utilisation de matériaux connus et maîtrisés, visant à faciliter la supervision de chantier). Ces contraintes peuvent aussi émerger de choix personnels ou conceptuels (comme la décision d'organiser tout un bâtiment autour d'un axe). Le « concept » (voir point 2.7 du présent chapitre) est ainsi un ensemble de contraintes construites par le concepteur.

Les premières proviennent du contexte externe au concepteur, les deux autres du contexte interne. Les contraintes peuvent aussi être conscientes ou inconscientes (Bonnardel, 2000).

Ces contraintes sont hiérarchisées. Elles portent un caractère de *validité* si leur gestion est impérativement nécessaire à la bonne réalisation de la conception, et un caractère de *préférence* si elles résultent du choix du concepteur, sans que leur résolution soit indispensable (Darses, 1992). Dans le cadre de la création de sites webs, Chevalier et Bonnardel (2003) ont montré que les concepteurs, novices ou experts, ne prennent pas nécessairement en compte la totalité des contraintes prescrites en écartant temporairement celles qui leur paraissent peu pertinentes. Ces concepteurs, principalement les experts, complètent le cahier des charges, même si celui-ci est déjà spécifié, précisément en inférant de nouvelles contraintes sur base de leur connaissance du domaine. Ces contraintes construites concernent moins des éléments de détails, que des catégories générales. Les contraintes et leur hiérarchie sont modifiées au fil de la conception : leur existence, leur importance et l'état de leur satisfaction évoluent en permanence à mesure que le concepteur avance dans la définition de l'objet (voir point suivant).

En outre, la structuration de l'espace de recherche s'opère aussi par l'adoption de « points de vue complémentaires » sur l'objet (Darses, 1992 ; Détienne, Martin, & Lavigne, 2005). De l'avancement de la conception découleront une structuration et une formulation différente du problème selon divers niveaux d'abstraction (de l'intention fonctionnelle - abstraite - à la fonction physique et à la forme, Rasmussen, 1983). Cette question des points de vue, ou cadres de référence (Akin & Akin, 1998) est essentielle dans la conception créative. Pour atteindre des solutions originales, il est nécessaire de changer de cadres de références et de modifier son point de vue sur l'objet. Ces changements de cadres sont plus faciles pour des experts, mais fournir de l'aide extérieure pour permettre ces changements de points de vue semble être une stratégie efficace de soutien à la conception (Bonnardel, 2000).

2.2.2. La génération de solutions

L'activité principale du concepteur engagé dans un problème de conception consiste à générer des solutions au problème et aux sous-problèmes. Ces solutions peuvent être élaborées à partir de connaissances générales du domaine et solliciter diverses modalités classiques de raisonnement, et diverses heuristiques de résolution de problèmes (Visser, 2001).

Mais la génération de solutions peut aussi faire appel à des *réutilisations* de connaissances et de solutions spécifiques (c'est-à-dire de bas niveau ou concrètes) développées préalablement dans le cas d'un autre problème (voir notamment le rôle central des analogies, au point suivant). Le

concepteur, pour générer des solutions, réutilise des savoirs antérieurs et des connaissances préalablement structurées tels que des schémas et solutions analogues (Darses, 2004). Ces connaissances ou solutions doivent être réadaptées au contexte du problème à traiter. La réutilisation participe donc bien de l'activité de conception.

Néanmoins, l'activité de conception ne se base jamais complètement sur des réutilisations (auquel cas il ne s'agit pas de conception à proprement parler) et un problème n'est jamais résolu entièrement *ex nihilo* (seuls certains sous-problèmes, dont la proportion peut être plus ou moins importante, peuvent se résoudre de la sorte, Visser, 2001). Ainsi, la conception est un processus qui implique l'interaction entre un espace de connaissances préalables et de concepts construits dans la situation (C-K Theory, Hatchuel & Weil, 2003), d'où son caractère situé. Visser (2006, 2009) distingue la *génération* de la *transformation* en fonction de la principale ressource sur laquelle se base l'activité de création. On parlera de génération si les éléments principaux du raisonnement sont des connaissances générales ou des éléments de la mémoire à long terme, et de transformation si l'activité générative est basée sur l'état actuel du projet de conception. A ce titre, Pahl évoque des recherches de solutions *génératives* ou *correctives* (Pahl, Badke-Schaub, & Frankenberger, 1999).

L'activité de génération de solutions consiste à répondre aux différentes contraintes qui forment l'état du problème. Il s'agit d'assigner une valeur à chacun des paramètres. Dans le champ de la résolution de problèmes, les contraintes possèdent deux facettes. D'une part, elles aident à structurer, limiter, voire contraindre l'espace de solutions. D'autre part, elles dirigent ou promeuvent la recherche dans de nouveaux espaces (et donc contribuent à la nouveauté, Stokes, 2009). Elles permettent de changer de cadre de référence ou de point de vue.

Compte tenu de la complexité des problèmes de conception, les concepteurs ne considèrent pas l'ensemble exhaustif des contraintes, mais au contraire traitent celles-ci progressivement et en s'autorisant une gestion flexible. Des décisions pourront ainsi être reportées, des valeurs pourront être assignées temporairement aux contraintes et leur statut (validité ou préférence) pourra évoluer (Darses, 1992). Les contraintes suivent généralement trois étapes (Chevalier & Cegarra, 2008) : la formulation, la satisfaction et la propagation. La formulation est la représentation mentale d'un lien entre deux variables sans qu'une valeur soit arrêtée, la satisfaction est l'attribution de valeurs aux variables et la propagation est la création de nouvelles contraintes suite à l'expression d'une contrainte antérieure. Plusieurs mécanismes de propagation de contraintes peuvent être observés en situation de conception : la propagation linéaire hiérarchique (spécification de l'abstrait vers le concret), le regroupement de contraintes, la mise en œuvre de schémas pour structurer la résolution de contraintes (en se basant sur des structures préétablies), ou encore l'utilisation de prototypes (simulations) pour définir le chemin le plus plausible (Darses, 1992).

En outre, au fil de la conception, les contraintes peuvent être relâchées en modifiant les valeurs satisfaisant ces contraintes, voire éliminées. Les relâchements ou éliminations peuvent être anticipatifs ou imposés si aucune solution n'est possible au regard du nombre de contraintes.

Les représentations externes - appelées aussi représentations intermédiaires de conception - servent de base à la génération. Elles sont des artefacts cognitifs (au sens de Norman, 1991) de l'expression de solutions. Elles évoluent à la fois du concret vers l'abstrait et de l'abstrait vers le concret (Darses, 2004). Nous reparlerons des représentations externes en conception spécifiquement, dans les sections suivantes (voir point 3 de ce chapitre).

2.2.3. Le raisonnement analogique

Le raisonnement analogique est à la base de la conception de solutions créatives (Visser, 2001 ; Leclercq & Heylighen, 2002). Il s'agit d'utiliser des objets, connaissances ou concepts existants pour s'inspirer lors de la génération de solutions. En effet, de nombreuses solutions originales (produits, procédés ou objets) empruntent leurs concepts à des champs parfois lointains. Le biomimétisme, qui consiste à emprunter à la nature des solutions et les adapter pour résoudre des problèmes techniques, est un exemple particulièrement visible de l'utilisation d'analogies en conception. Le Velcro, par exemple, est inspiré des fleurs de la bardane et de ses micro-crochets, la structure de la surface des fenêtres auto-nettoyantes est inspirée de celle du lotus sacré aux vertus hydrophobes et, plus proche de l'architecture, certaines habitations écologiques sont inspirées du modèle des termitières. Néanmoins, si ces exemples sont flagrants et saillants, ils constituent une frange minime du raisonnement analogique. Les caractéristiques de ressemblance sont d'ailleurs souvent reconstruits *a posteriori*. Dans le cours des activités de conception, les acteurs font appel à nombreuses « micro-analogies », moins flagrantes une fois le résultat fini mais réellement structurantes pour l'action créative. La construction de ces analogies en conception est un processus central et récurrent (Leclercq & Heylighen, 2002, évaluent la quantité de ces analogies en conception préliminaire à environ six par heure).

La réalisation d'analogies a pour objectif d'ouvrir ou, au contraire, de fermer l'espace de recherche de solutions pour un problème de conception. Ainsi, réaliser des analogies permet d'adapter directement des concepts à la solution en cours, de redéfinir le problème en s'inspirant d'autres types de solutions, et de créer de nouvelles contraintes similaires ou contraires aux objets sources de l'analogie (Bonnardel 2009).

Les analogies possèdent plusieurs propriétés (Leclercq & Heylighen, 2002). Chaque analogie a une source, qui est le concept, l'objet ou la relation utilisée pour faire l'analogie. Elle a aussi une cible, le sous-problème ou l'élément sur lequel portera l'analogie. Elle a également une origine et un déclencheur, les contextes respectifs de la source et de la cible. Les analogies sont conscientes ou inconscientes, contrôlées ou spontanées et peuvent porter sur des objets, des attributs d'objets ou des relations entre objets. Enfin, les analogies peuvent être réussies (aboutissant à la résolution du sous-problème), ratées (non-résolution du sous-problème), ou inutilisées (l'analogie fonctionne mais ne concourt pas à solutionner le problème).

Dans une optique d'aide à la conception, Bonnardel (Bonnardel, 2000, 2009, Chevalier & Bonnardel, 2003) a étudié expérimentalement le raisonnement analogique et évalué son impact sur la créativité (mesurée par la quantité de sources d'inspiration différentes évoquées lors de la conception) en fonction de plusieurs variables :

- l'expertise des concepteurs ;
- la présence de référents fournis par l'expérimentateur (sources potentielles d'analogies) ;
- la proximité de ces référents au domaine-cible. Ces référents peuvent être internes au domaine (un type de chaise pour inspirer la création d'une chaise, par exemple) ou externe au domaine (une position d'escalade pour inspirer la création d'une chaise) ;
- les modes de présentation de ces référents. Ceux-ci peuvent être présentés sous forme verbale par un mot représentant une catégorie, ou sous forme graphique, par l'image d'une instance de ces catégories.

Les résultats de ces différentes expérimentations montrent que, d'une manière générale, les concepteurs expérimentés évoquent plus de sources d'inspiration que les novices. Ils montrent aussi que la fourniture de référents aux concepteurs les invite à faire plus d'analogies que dans des conditions « libres », sans aucune proposition. Chez les novices, le type de référents ne change pas sensiblement le nombre de sources évoquées. Chez les experts, on constate deux tendances : si les référents sont intra-domaines, les concepteurs tendent à utiliser moins de sources (ce que d'autres auteurs ont observé en tant que « biais de fixation »), et si les référents

sont inter-domaines, ils ont tendance à utiliser plus de sources, principalement inter-domaines. La nature des référents serait donc un élément important : des catégories générales (les noms uniquement) et des objets extra-domaine inciteraient les concepteurs à réaliser des inférences plus conceptuelles (à un plus haut niveau d'abstraction) et, dès lors, à générer plus d'idées.

Leclercq et Heylighen (2002) ont étudié le *processus* de pensée analogique en conception. Ils observent aussi que la plupart des analogies sont d'ordre spontané et que plus le lien entre la source et la cible est complexe, plus les analogies sont efficaces. Dès lors, ils en concluent notamment qu'avec un taux de succès des analogies avoisinant les 75%, ce type de raisonnement pour la conception est relativement efficace. Ils ajoutent que la liberté totale de l'esprit lors des étapes de création est bénéfique, car elle permet entre autres la création d'analogies spontanées complexes et particulièrement efficaces. Ils montrent aussi qu'environ la moitié des analogies est déclenchée par des représentations externes, mais que cette proportion peut varier fortement entre deux individus.

2.2.4. L'évaluation des solutions

Au cours de l'activité, la conception fait appel à des évaluations récurrentes de la part du concepteur¹¹. D'un point de vue général, l'évaluation d'un élément consiste à juger de l'adéquation de cet élément en rapport avec des référents, dans le cours de la conception. Ce processus d'évaluation réflexive a quelques particularités.

Premièrement, les référents évaluatifs en conception sont de plusieurs natures, tout comme les contraintes auxquels ils sont liés.

- Ils sont soit externes, c'est-à-dire imposés par le client ou les normes des entreprises, soit internes, à savoir propres aux concepteurs, en fonction de leurs préférences, des points de vue qu'ils adoptent sur l'objet ou des tâches qu'ils effectuent (Bonnardel, 1999).
- Ils peuvent être de niveaux d'abstraction différents.
- Ces référents peuvent aussi être relatifs aux caractéristiques générales de la conception et au domaine, ou au contraire spécifiques au produit.

Bonnardel (1999) a montré, pour des situations de conception aéronautique, que les concepteurs utilisaient peu de référents (entre 6 et 8) pour évaluer un produit de conception, et que ceux-ci étaient essentiellement généraux.

Une deuxième caractéristique tient au fait que les référents évaluatifs ne sont pas toujours préexistants à la situation de conception, et évoluent au cours de celle-ci. Comme évoqué précédemment, les différentes contraintes sont hiérarchisées et cette hiérarchisation est modifiée par le concepteur au cours du temps, en fonction de l'état de la solution et des différentes évaluations du produit de la conception. De même, les critères et contraintes sont soumis à des évaluations de la part du concepteur, qui vont permettre de modifier leur niveau de priorité et leur hiérarchie (Bonnardel, 1999). Cette hiérarchisation est en effet essentielle. Dans la plupart des situations de conception, les différentes contraintes sont tellement nombreuses qu'il n'est souvent pas possible de les prendre toutes en compte : soit elles sont incompatibles ou contradictoires, soit la prise en compte de tous ces critères est trop coûteuse au point de vue cognitif. Il devient dès lors nécessaire de pouvoir effectuer cette hiérarchisation. En architecture, le cas particulier du concept (ou parti architectural) est intéressant à étudier car il est construit par le concepteur et il lui

¹¹ Nous n'abordons ici que les évaluations dites « réflexives », qui prennent place en même temps que les activités de génération et de structuration du problème. D'autres types d'évaluations concernant l'artefact en conception, mais qui prennent place à des niveaux plus globaux au sein de l'entreprise ou de l'organisation (évaluations politiques, stratégiques ou tactiques, Bonnardel, 1999), ne seront pas abordées ici, car dépassant le cadre de ce travail.

fournit des contraintes parfois bien plus fortes que d'autres types de contraintes externes (c'est ainsi que bien souvent, principalement chez des architectes à forte notoriété, le budget est régulièrement dépassé au profit du respect d'un concept structurant du bâtiment).

Troisièmement, il est impossible de pouvoir évaluer de manière exhaustive un produit en cours de conception et ce, pour deux raisons. D'une part, les connaissances évaluatives sont toujours limitées, soit par manque d'expérience dans le cas des novices, soit par la trop importante complexité du domaine. Dans ce cas, d'autres partenaires possédant une expertise différente doivent compléter les connaissances évaluatives des concepteurs. D'autre part, la génération de toutes les solutions d'un problème de conception étant impossible et la conception pouvant s'étaler dans le temps, les évaluations portent la plupart du temps sur des solutions partielles et parfois abstraites (Darses, 2004). L'évaluation n'est en outre pas systématique : les solutions peuvent être évaluées partiellement, pendant ou après leur production, par étapes, simultanément, etc. (Visser, 2001). C'est ainsi que la conception est souvent dictée par une recherche de compromis, c'est-à-dire la recherche d'une solution la plus satisfaisante possible, plutôt que la recherche d'une solution optimale ou parfaite. Cet état de fait est notamment dû à l'impossibilité d'envisager toutes les solutions possibles d'un problème de conception (Visser, 2009b). Ainsi, le caractère *satisfaisant* d'une solution n'est pas toujours simple à déterminer, notamment en conception collaborative où il sera sujet à négociations (Bonnardel, 1999).

Il existe plusieurs modes d'évaluation en conception (G. Martin, Détienne, & Lavigne, 2001).

- L'analytique permet de juger de la solution en rapport avec des référents évaluatifs.
- La comparative évalue plusieurs solutions les unes par rapport aux autres. La comparaison peut se faire entre plusieurs solutions alternatives ou entre une solution et une situation de référence.
- L'analogique utilise un jugement fait antérieurement sur une solution similaire, pour le même problème ou pour un autre. Le raisonnement analogique tient donc aussi une place importante dans l'évaluation de la solution.

A ces trois modes, on peut ajouter une évaluation dite globale (Bonnardel, 1999) qui permet d'appréhender d'emblée l'intérêt d'une solution, sans l'envisager dans ses détails ou ses caractéristiques techniques.

Ces évaluations, intervenant de manière régulière et à des moments clés, vont permettre de contrôler l'activité. L'évaluation d'éléments de la solution va permettre de déterminer l'étape suivante de la conception, de sélectionner une solution parmi d'autres ou de définir les points d'attention du concepteur, c'est-à-dire gérer la hiérarchie des contraintes. (Bonnardel, 1999). Ainsi, si les activités de génération de solutions tendent à ouvrir l'espace-problème et l'espace des solutions, les activités d'évaluation ont pour objectif de le refermer, au travers de la comparaison de plusieurs solutions entre elles ou en rapport avec des critères, et de la sélection de la(les) solution(s) la(les) plus appropriée(s) (Stempfle & Badke-Schaub, 2002)

Trois types de difficultés interviennent généralement dans les activités d'évaluation en conception (Bonnardel & Sumner, 1996).

- Les connaissances évaluatives sont souvent incomplètes, soit par manque d'expérience, soit car le domaine est trop étendu. Il n'y a en outre généralement pas de métrique objective pour évaluer un processus de conception.
- Il est nécessaire d'évaluer un produit de plusieurs perspectives, de prendre en compte certaines contraintes ou critères différents, et donc d'adopter plusieurs points de vue sur l'artefact en conception. Une solution n'est pas correcte ou incorrecte, elle est plus ou moins acceptable ou intéressante.
- Les concepteurs ne reconnaissent pas toujours les solutions problématiques. Il n'est pas toujours simple, principalement pour les débutants, d'identifier des failles ou des difficultés dans les solutions proposées. Or ces identifications sont nécessaires à l'évaluation des décisions, car

c'est souvent au moment où des difficultés surviennent que des évaluations prennent explicitement place.

2.3. Stratégies et organisation de l'activité de conception

Alors que les premières théories de la conception identifiaient des *phases* dans le processus, à savoir une phase de structuration du problème et une phase de génération de solutions (voire une troisième phase d'évaluation), les études empiriques menées sur des activités de conception ont montré qu'il s'agit en vérité d'activités cognitives menées en parallèle. Ainsi, la conception est caractérisée par une succession de mouvements visant à ouvrir et fermer l'espace-problème (Stempfle & Badke-Schaub, 2002). Même dans le domaine de la conception mécanique, où de nombreuses méthodes formelles existent, les étapes prescrites ne sont pas respectées et sont bien souvent recouvrantes (Hatchuel & Weil, 2003). De plus, comme évoqué précédemment, les problèmes sont régulièrement restructurés dans le cours de l'activité (Visser, 2009b). L'interdépendance forte entre la génération de solutions et leurs évaluations limite très fortement la pertinence des modèles prescriptifs linéaires séquentiels de la conception, préconisant une distinction entre l'analyse et la prise de décision (Darses *et al.*, 2001, Stempfle & Badke-Schaub, 2002). En outre, les observations sur des concepteurs attestent que les différentes stratégies mises en place par les concepteurs varient en fonction des individus, de leurs préférences et de leur formation, sans que néanmoins une stratégie puisse être unanimement qualifiée comme étant plus efficace qu'une autre (Pahl *et al.*, 1999).

L'activité de conception, par ses caractéristiques intrinsèques (manque de structure, coexistence de plusieurs solutions et évolution constante des contraintes) crée deux conséquences au niveau des stratégies mobilisées (Darses, 2004).

- D'une part, la complexité des problèmes implique de les structurer, les décomposer en sous-entités à traiter séparément (Visser, 2009b), en d'autres termes d'adopter des stratégies d'organisation *top down* des activités¹². Ces mouvements descendants impliquent aussi une hiérarchie d'abstraction : le découpage se fait à partir d'éléments de haut niveau d'abstraction vers des entités plus concrètes.
- D'autre part, l'importance, la découverte progressive et l'évolution constante des contraintes, couplées au rôle joué par les représentations externes dans la conversation avec la situation, incitent à privilégier des bas niveaux d'abstraction (des représentations concrètes) dans la génération des solutions, plus aisément évaluables. Il s'agit donc de privilégier des modes d'organisation *bottom-up* des activités cognitives.

Deux types de stratégie peuvent donc être observés et coexister : une stratégie de décomposition et une stratégie de résolution par étapes successives. La première vise à structurer la conception en différentes sous-entités à traiter de manière relativement indépendante ; la seconde tend à traiter le problème dans son ensemble, mais de manière itérative. Alors que ce sont des stratégies décompositionnelles qui sous-tendent l'essentiel des méthodes formelles, il semblerait que cette stratégie ne fonctionne cependant que si le problème comprend un nombre limité de sous-problèmes interdépendants et si le concepteur a déjà conçu des solutions partielles dans le même domaine (Pahl *et al.*, 1999).

Dans le même ordre d'idée, Stempfle & Badke-Schaub (2002) ont observé deux types de processus de choix dans des situations de conception. Dans la première (*process 1*), les évaluations des solutions proposées ont lieu très rapidement, sans que celles-ci aient été analysées en profondeur. Ce mode de fonctionnement permettrait un gain de temps et une

¹² La stratégie décompositionnelle d'Alexander (1971, cité par Leclercq, 1994) est un exemple extrême de ce mouvement descendant. Il suggère qu'une décomposition totale de la conception en sous-éléments soit un préalable à la définition de la forme de l'objet.

simplification du problème, mais pourrait potentiellement mener à des erreurs, notamment à un rejet ou une acceptation trop rapide d'éléments de solutions (*premature commitment* ou *premature rejection*). Dans la seconde (*process 2*), les concepteurs agissent d'une manière proche des modèles et méthodes prescrites de la conception : la génération d'une solution est suivie par son analyse approfondie, elle-même suivie de son évaluation qui pourra mener à l'acceptation de l'idée ou à la génération de nouvelles solutions. Cette analyse approfondie systématique est plus coûteuse et n'est donc pas toujours mise en place. La première stratégie serait efficace dans les problèmes ayant un niveau de complexité peu élevé. A tout moment, et suivant les évolutions de la conception, les concepteurs peuvent passer d'un type de stratégie à un autre.

Ainsi, l'activité s'organise généralement de manière opportuniste, permettant une articulation des structurations ascendantes et descendantes de l'action. Les plans et stratégies sont établis sur base des opportunités de la situation (Darses, 2004). « *L'organisation d'une activité est qualifiée d' "opportuniste" quand le concepteur ne suit pas strictement, c'est-à-dire sans déviations, un chemin prédéterminé selon un plan préétabli, mais tire profit des possibilités d'action qui se présentent au cours de son activité et qu'il interprète comme des "opportunités" du point de vue de leur "coût cognitif" »* (Visser, 2001, p. 8). L'activité de conception est caractérisée par un principe de récursivité : « *Design do not only transform projects into solutions, but also projects into projects, or design problems into design problems »* (Hatchuel & Weil, 2003, p. 3). Cette organisation émergente de l'activité est caractérisée par un principe de flexibilité cognitive, poussé par une tendance à l'économie : à certains moments et pour certaines situations, il sera moins coûteux de faire émerger les réflexions de la situation et des représentations concrètes du problème ; alors qu'à d'autres moments ou pour d'autres situations, il sera préférable d'adopter des stratégies descendantes qui permettent de structurer et organiser le problème pour y répondre de manière efficace. Ce principe de flexibilité et d'économie cognitive est sous-jacent à toute résolution de problèmes. Dans les activités cognitives humaines, une tendance naturelle vise une réduction de la complexité qui permet notamment la résolution des situations par nature complexes, telles que les problèmes de conception. Ce principe d'économie cognitive existe aussi dans l'utilisation des représentations externes dans les activités humaines (voir point 1.3 du présent chapitre).

Malgré ce caractère opportuniste, certaines « bonnes pratiques » en conception peuvent être identifiées : l'analyse du but dans les étapes initiales, la production de différentes solutions alternatives avant l'approfondissement de ces solutions, ou encore le maintien à un haut niveau d'abstraction lors des premières étapes du projet (Darses *et al.*, 2001). Globalement, un bon produit de conception est obtenu quand les concepteurs mettent en place une bonne analyse du problème, du but et des sous-buts ; une première phase préliminaire visant à décider d'un principe général efficace ; des recherches d'abord divergentes puis rapidement convergentes, avec des évaluations récurrentes ; et une réflexion constante sur les pratiques et procédures et leur adaptation au contexte donné (Pahl *et al.*, 1999).

En outre, certains auteurs comme Lebahar (1983) ont identifié des mouvements globaux dans le processus de conception. Ainsi, il constate un double mouvement de précision croissante des représentations externes, en lien avec une réduction de l'incertitude du modèle mental de l'objet architectural. Cette observation n'est cependant pas contradictoire avec le fait qu'au niveau local, l'activité soit organisée de manière opportuniste. Nous reviendrons sur les évolutions des représentations externes dans la conception au point 3.5.

2.4. Conception et créativité

Comme évoqué précédemment (voir chapitre 1, point 1), la conception préliminaire consiste en l'émergence des idées principales et nouvelles qui vont structurer l'ensemble de la définition d'un produit. La conception (hors conception dite « routinière », activité assez rare, particulièrement en

architecture) est donc par essence un processus créatif : « *Design is a process by which something unknown can intentionally emerge from what is known* » (Hatchuel & Weil, 2003, p. 2). Il convient donc de faire un pont entre ces deux notions.

La créativité est une notion très large, étudiée dans de nombreux domaines et avec de nombreuses approches. Il en ressort que ce concept est une notion fort ambiguë¹³. De nombreux auteurs ont étudié la pensée créative des grands artistes ou innovateurs (Csikszentmihalyi, 1997) ou au contraire ont envisagé la créativité comme une activité cognitive courante. C'est ainsi que l'on distingue la créativité historique, reconnue unanimement comme ayant un impact sur notre société, de la créativité psychologique, impliquée dans des activités plus communes, voire dans la vie quotidienne (Boden 1990, cité par Bonnardel, 2009). En nous adressant au cas de la conception courante en architecture, c'est dans cette dernière optique que nous nous situons.

Dans le champ de l'étude des processus et conditions qui mènent à la créativité, Sternberg (2006) affirme que celle-ci émerge d'un entrelacement complexe de six composantes : les capacités intellectuelles, les styles de pensée, la personnalité, la motivation, les connaissances et l'environnement. La plupart des théories de la créativité se concentrent sur les attributs personnels de la créativité et moins sur le contexte (Sternberg, 2006). Dans ce travail, c'est principalement ce dernier point qui nous intéresse, à savoir les conditions matérielles de l'émergence de la créativité en conception.

Une définition générale de la créativité peut être empruntée à Akin & Akin : « *Creativity is the process that leads to the creation of products that are novel and valuable* » (Akin & Akin, 1998, p. 123) « *La créativité consiste, notamment, à faire appel et à rassembler de façon nouvelle des connaissances anciennes afin de générer de nouvelles propriétés à partir des anciennes* » (Chevalier & Bonnardel, 2003, p. 34). A noter que la question de la nouveauté est à comprendre dans le contexte précis (temporel, spatial, culturel, etc.) dans lequel l'activité créative prend place.

Plusieurs approches envisagent la créativité comme un processus, notamment dans le champ de la *Creative Cognition*. Dans cette optique, la notion même d'activité créative est proche de celle de conception. La créativité, quand étudiée pour les processus cognitifs qu'elle met en œuvre, est considérée comme une activité de résolution de problèmes mettant en jeu des processus cognitifs « ordinaires ». Elle vise la transformation d'un but initial en but final et fait appel à des connaissances antérieures (Chevalier & Bonnardel, 2003). Ainsi, dans leur théorie de la cognition créative (Geneplore), Ward et ses collaborateurs (voir notamment Ward, 2001) considèrent que la créativité est par essence composée des processus de génération et des processus d'exploration. La génération vise à rechercher en mémoire, associer et combiner des concepts (appelés formes pré-inventives) qui seront sélectionnés s'ils répondent à des critères (esthétique, nouveauté, etc.). Ce processus est à rapprocher de la génération de solutions dans les approches classiques de la conception (voir point 2.2.2). L'exploration est l'évaluation, la modification et l'élaboration de ces formes pré-inventives pour qu'elles deviennent le produit créatif, une notion très proche de ce que Schön (1983) appelle la « conversation avec la situation ». Tout comme la conception, la cognition créative sollicite aussi des évaluations sur base de critères internes ou externes et considère que les processus génératifs et exploratoires sont itératifs.

¹³ Le terme est tellement polysémique qu'un ouvrage entier est consacré à la collection de définitions parfois contradictoires : Aleinikov, A. ; Kackmeister, S. & Koenig, R. (2000) *Creating Creativity: 101 Definitions (what webster never told you)*. Midland, MI: Alden B. Dow Creativity Center Press.

L'émergence d'idées créatives serait principalement expliquée par une analyse approfondie du problème¹⁴. De la sorte, l'activité de formulation est essentielle pour créer des ponts entre les données du problème et les solutions potentielles. C'est après une longue étape d'analyse que peuvent émerger les concepts qui pourront être qualifiés de créatifs (Dorst & Cross, 2001). La longueur et la qualité du processus d'exploration pourront donner naissance à des processus plus créatifs (Ward, 2001), tout comme l'analyse approfondie d'un problème de conception permettra d'aboutir à des solutions plus appropriées (Stempfle & Badke-Schaub, 2002). Le degré de créativité est variable : un processus créatif peut mobiliser des connaissances connues mais nécessiter un important travail de recherche conceptuelle (un assemblage original d'idées préexistantes), ou mobiliser la création de nouvelles connaissances sans pour autant nécessiter un travail conceptuel d'envergure (ce sera le cas des domaines très technologiques ou de la recherche et du développement) (Hatchuel & Weil, 2003).

Une autre approche, dont le but est de lier spécifiquement la créativité et la conception et de comprendre les conditions de l'émergence de la créativité peut être trouvée dans la notion de *flow* (Csikszentmihalyi, 1997). Il s'agit d'un état particulier de conscience, relatif à une « expérience optimale », qui permet l'émergence de la créativité. Cet état psychologique de *flow* fournirait les conditions nécessaires à la naissance d'épisodes créatifs, c'est-à-dire l'émergence d'idées innovantes dans la résolution de problèmes (processus génératif). Cette notion a été reprise par Dorta (2008), qui introduit la notion de *design flow*. Il observe que les concepteurs engagés dans un processus d'idéation passent par une suite de différents états mentaux et stressants (anxiété, inquiétude, excitation) au début de l'idéation pour continuer dans une expérience optimale de *flow* lorsque les concepts prennent forme. Ils aboutissent à des états moins stressants, comme le contrôle et la relaxation, lorsque les concepts sont maîtrisés.

Néanmoins il ne nous semble pas opportun de distinguer la pré-conception (que nous nommons conception créative) de la cognition créative prise au sens plus large. En effet, Bonnardel (2009), comparant les modèles classiques de la conception et ceux de la créativité, constate que ces deux notions sont très proches : les phases d'analyse, de génération et d'évaluation de solutions sont présentes dans les deux modèles, même si on ajoute parfois des étapes d'incubation ou d'« illumination » (*insight*, Wallace 1926, cité par Leclercq 1994 ou *AHA! response*, Akin & Akin, 1998) dans les modèles de créativité. En comparant les définitions de la conception et de la créativité, Bonnardel constate aussi que la majorité des concepts de ces définitions sont partagés : création d'un produit, adaptation au contexte, utilisation de connaissances antérieures. Elle note cependant qu'il est fait exception du « *trait majeur de la créativité qu'est la nouveauté [qui] n'apparaît, par contre, pas explicitement dans de telles définitions [de la conception]* » (Bonnardel, 2009, p. 8). Cette nouveauté est cependant culturellement définie et varie en fonction du temps, du lieu et du domaine de référence (Akin & Akin, 1998, Stokes, 2009). Elle se rapproche donc de la notion d'adaptation au contexte¹⁵, essentielle en conception.

Il est d'autant moins opportun d'adresser spécifiquement la notion de créativité en conception car il est ardu de la mesurer ou de l'observer précisément. Même si les jugements d'experts sont relativement unanimes sur le caractère créatif d'une solution, ces mêmes experts peinent à définir de manière univoque cette notion (Dorst & Cross, 2001). Les différentes approches utilisées dans la littérature pour mesurer la créativité sont soit tournées vers le processus (par exemple en quantifiant l'utilisation d'analogies, Bonnardel 2000, 2009), soit vers le produit (en mesurant les

¹⁴ Malgré qu'il puisse y avoir des exceptions, il est généralement admis que la créativité se base sur une connaissance approfondie du domaine dans lequel elle s'inscrit. Ainsi, pour pouvoir apporter une solution réellement novatrice à un problème, il est souvent nécessaire d'avoir pris conscience du problème sous toutes ses facettes.

¹⁵ A noter que, particulièrement en architecture, la notion d'adaptation au contexte est assez large : une manière de répondre au contexte peut être justement de tenter de ne pas s'y adapter. Cependant, cette manière de procéder consiste tout de même en une réaction à un contexte temporel, culturel ou artistique.

écarts entre la solution et un référent, en analysant la quantité d'idées proposées dans la solution et leur nature, en faisant juger des experts, ou encore en quantifiant les liens entre les différentes idées présentes dans la solution, Goldschmidt & Tatsa 2005)

Dans la mesure où ce travail s'adresse à la conception préliminaire en architecture, dans l'étape dite de « conception créative », nous n'opérons pas dans ce travail de distinction entre conception et créativité.

2.5. Variabilité interindividuelle dans la conception

La conception, dans sa mise en œuvre, est un domaine sujet à une large variabilité. Ainsi, même dans des conditions similaires, deux concepteurs n'aborderont pas un problème de conception de la même façon. Divers facteurs d'ordre individuel auront une influence sur les modes de raisonnement analogique (Bonnardel, 2000 ; Leclercq & Heylighen, 2002), les stratégies de décomposition du problème (Akin, 2001) et la quantité de solutions générées.

2.5.1. Expertise

Il est difficile de définir le concept d'expertise dans le champ de la conception : en effet, l'expertise est intimement liée au domaine d'application. Il n'y aurait donc pas d'expert de la conception, mais des experts en architecture, en mécanique ou en conception logicielle. Néanmoins, dans chacun de ces domaines, des différences entre concepteurs expérimentés et novices ont pu être identifiées.

D'une manière générale, les concepteurs expérimentés conçoivent plus vite et arrivent à un meilleur résultat que les novices (Pahl *et al.*, 1999)¹⁶. Néanmoins, cette relation n'est pas déterministe : l'expérience acquise doit être mobilisée de manière flexible pour être efficace. Les experts mobilisent des stratégies différentes (Pahl *et al.*, 1999) : alors que les novices formés aux méthodes et procédures tendent à appliquer ces méthodes, les experts raisonnent plutôt étape par étape. Les concepteurs expérimentés semblent également plus enclins des stratégies de réutilisation pour générer des solutions (stratégies dites « correctives »). Suwa & Tversky (1997) ont montré que les architectes professionnels avaient tendance, sur un temps limité, à avoir une approche plus structurée que les étudiants, avec des sauts conceptuels moins nombreux mais des idées plus approfondies. Les experts mobilisent des raisonnements visuels plus élaborés, inférant plus de caractéristiques fonctionnelles et relationnelles à la lecture de leurs propres dessins (Kavalki, Suwa, Gero, & Purcell, 1999).

Au sujet de la pensée analogique, les experts tendent à utiliser plus de sources d'inspiration que les novices (Bonnardel, 2000) (voir point précédent - 2.4).

Nous ne nous étendons pas sur cette notion d'expertise, compte tenu qu'elle n'est pas l'objet de notre recherche empirique. Nous discuterons néanmoins de ce point dans la section « méthodes ».

¹⁶ A noter que la notion de « meilleur résultat » peut être sujet à controverse, surtout lorsque l'on s'adresse à des activités créatives. Cependant, on peut affirmer que l'expertise jouera un rôle dans l'« efficacité » de la conception, c'est-à-dire dans sa pertinence technique.

2.5.2. Formation

La formation initiale des concepteurs influe également sur leur comportement. Les concepteurs largement entraînés aux méthodes de conception mobilisent des stratégies différentes, même s'ils n'appliquent pas rigoureusement les méthodes qu'ils maîtrisent (Pahl *et al.*, 1999) : ils ont tendance à mieux structurer le problème en début de conception, de sorte que cette maîtrise des méthodes de conception facilite la résolution de nouveaux types de problèmes¹⁷.

2.5.3. Personnalité et capacités

Parmi les autres différences interindividuelles qui ont un impact sur les stratégies observées ou sur la qualité du produit de la conception, on retrouve la « compétence heuristique », c'est-à-dire la capacité générale à résoudre des problèmes, la motivation ou encore l'« imagination spatiale » (Pahl *et al.*, 1999).

La formation d'analogies serait aussi influencée par des « styles » préférentiels. Ainsi, Leclercq & Heylighen (2002) ont identifié deux stratégies dans le raisonnement analogique, selon les sources des analogies. Certains individus utiliseraient préférentiellement des expériences personnelles pour l'inspiration, alors que d'autres se baseraient plutôt sur des connaissances spécifiques directement reliées au problème.

Néanmoins, dans une approche d'outillage et de support à la conception, nous nous intéressons peu à ces dimensions personnelles de la conception. Même si dans nos études nous n'excluons pas d'identifier des « styles » qu'il convient de supporter, nous ne tenterons pas d'expliquer les différences observées par des traits de personnalité.

2.6. Erreurs en conception

La notion d'erreur en conception, et particulièrement en conception architecturale, est peu étudiée spécifiquement dans la littérature. Elle possède cependant un statut particulier.

- L'erreur fait partie intégrante du processus de conception : la génération de solutions, la propagation de contraintes et le raisonnement analogique, et plus généralement la « conversation avec la situation » (Schön, 1983) mobilisent des stratégies de type « essais et erreurs ».
- Compte tenu de la permanente évolution des problèmes de conception et des solutions associées, les erreurs sont aussi de nature évolutive. Ainsi, une action *a priori* tout-à-fait pertinente pourra se révéler être une erreur bien plus tard dans le processus.
- En outre, les erreurs en conception peuvent perdurer pour une grande période, et mener à des conséquences désastreuses si elles ne sont pas corrigées. Ainsi, dans des cas extrêmes, des erreurs commises à la phase créative peuvent invalider complètement la conception d'un bâtiment, des semaines voire des mois plus tard, à l'étape du permis d'urbanisme par exemple (Juchmes *et al.*, 2004, Leclercq, 1994).

¹⁷ Dans les études que nous mettons en place dans ce travail, nous observons essentiellement des ingénieurs-architectes dont la formation est assez spécifique. Cette formation étant peu répandue, nous n'avons pas d'indice nous permettant d'identifier des styles de conception particuliers de cette population, en comparaison avec celle des architectes. Notre expérience, complétée d'une étude exploratoire (Burkhardt *et al.*, 2008), tend à nous faire penser que les étudiants de profil ingénieurs adoptent spontanément une démarche plus fonctionnelle, en comparaison avec les étudiants des Beaux-arts qui adoptent une démarche plus esthétique. Aucun élément ne nous laisse cependant penser que cette différence observée perdure dans la pratique professionnelle.

En nous basant sur les théories générales de l'erreur humaine, nous avons mené une étude empirique visant à mieux comprendre l'erreur, son rôle, ses modalités de détection et de recouvrement, et la prise de décision en conception.

L'erreur humaine est étudiée depuis longtemps dans les sciences cognitives. On peut en distinguer trois principaux types en fonction de leur origine et du niveau de contrôle de l'action sous-jacent (Reason, 1993, Rasmussen, 1990).

- Les **fautes** (*mistakes*) sont dues à des problèmes de planification : l'action est exécutée correctement, selon le plan et l'intention, mais le plan est erroné. Ces erreurs sont dues à une mauvaise utilisation de *règles* ou à un manque de *connaissances*.
- Les **lapsus** (*lapses*) sont des déficits de rétention : l'intention ou le plan n'est pas récupéré ou est récupéré, mais pas au bon moment.
- Les **ratés** (*slips*) sont des problèmes d'exécution : le plan est correct, correctement rappelé mais l'exécution erronée. L'erreur est basée sur la mauvaise utilisation d'*automatismes*.

La détection d'erreur est la prise de conscience de l'apparition d'une erreur, indépendamment de la compréhension de sa nature et de sa cause. Sellen (1994) identifie trois niveaux de détection des erreurs :

- la **détection basée sur l'action**, où l'erreur est détectée en utilisant les informations fournies pendant l'exécution de l'action erronée ;
- la **détection basée sur les résultats des actions**, où l'erreur est détectée par l'observation des résultats de l'action erronée ;
- la **détection basée sur la limitation des fonctions**, où l'erreur est détectée car elle a créé de nouvelles contraintes qui empêchent l'individu d'effectuer certaines nouvelles actions.

Ces modes de détection possèdent un caractère hiérarchique. La détection basée sur l'action est le premier niveau de détection. Si l'individu ne parvient pas à la repérer lors de son exécution, l'erreur produit des conséquences, qui vont permettre de la détecter. Toutefois, si la détection fondée sur les conséquences échoue également, l'individu pourra être limité ou stoppé dans ses actions ultérieures. Habituellement, les dommages causés par l'erreur augmentent avec le niveau de détection : plus tard l'erreur est détectée, plus grandes seront les conséquences et les difficultés à les récupérer.

En conception architecturale, nous définissons l'erreur comme *toute action et/ou décision qui mène à un résultat non compatible avec les données du problème et avec le développement d'une solution efficace d'un point de vue fonctionnel, culturel et technique*. Cette définition met en évidence que l'erreur peut provenir d'une action ou d'une décision (intention) et que le résultat d'une action doit être en mesure de répondre à plusieurs critères en même temps. Quand un critère n'est pas rempli, alors l'action ou la décision devient une erreur. Cette définition ne porte pas de jugement sur l'importance de l'erreur.

Notre étude empirique sur l'erreur en conception architecturale menée sur des étudiants (Safin *et al.*, 2008a ; 2008b) nous a permis d'identifier les éléments suivants :

- près de trois erreurs sur quatre sont des fautes ;
- les erreurs adviennent généralement quand le concepteur dirige son attention vers des caractéristiques non pertinentes de la situation, ou quand les limites de ses ressources attentionnelles l'empêchent de se centrer sur ces caractéristiques pertinentes ;
- elles sont majoritairement détectées par les observateurs (le concepteur n'en détecte qu'un tiers) ;

- cette détection se base principalement sur les résultats de l'action et est plus efficace si l'erreur appartient à une situation connue ou habituelle ;
- la méconnaissance du résultat à atteindre (ou d'un « bon résultat ») est la source principale de non-détection ;
- l'erreur est détectée en fonction de critères extérieurs à ceux sur lesquels l'action erronée a porté.

Ces résultats soulignent la difficulté d'anticiper et de détecter les erreurs, ainsi que l'importance de disposer d'un regard extérieur sur le produit de la conception. Celui-ci s'avère en effet nécessaire pour pouvoir détecter et comprendre les erreurs. Ce constat est dû selon nous aux propriétés des problèmes de conception et notamment à leur complexité, l'impossibilité de connaître la solution à l'avance, l'évolution permanente des contraintes et des référents évaluatifs et à la nature très changeante du contexte. Compte tenu de ces évolutions, une action correcte au moment de son exécution peut s'avérer ultérieurement être une erreur.

Pour comprendre les erreurs en architecture, nous proposons un modèle de la prise de décision basé sur la notion de « contexte évolutif ». Le contexte est ici défini comme « l'ensemble des éléments d'une situation sur laquelle se base l'intentionnalité ». Il comprend l'ensemble des contraintes, les représentations internes (modèle mental) et externes (plans, dessins, etc.) de l'objet architectural, et l'« historique » du design, notamment les évolutions passées des différentes contraintes. Cet historique permet de ne pas tomber deux fois dans la même impasse. Ce contexte est évolutif : il change constamment durant la conception. Quand un concepteur génère ou évalue des solutions, il modifie un ou plusieurs éléments de la conception pour répondre au contexte et atteindre un certain équilibre, mais il modifie aussi le contexte. Les différentes conséquences que sa décision génère, dont certaines sont cachées, forment un nouvel équilibre auquel il va devoir adapter son objet. Le processus de décision et de détection de l'erreur en conception peut être décrit en différentes étapes (figure 15).

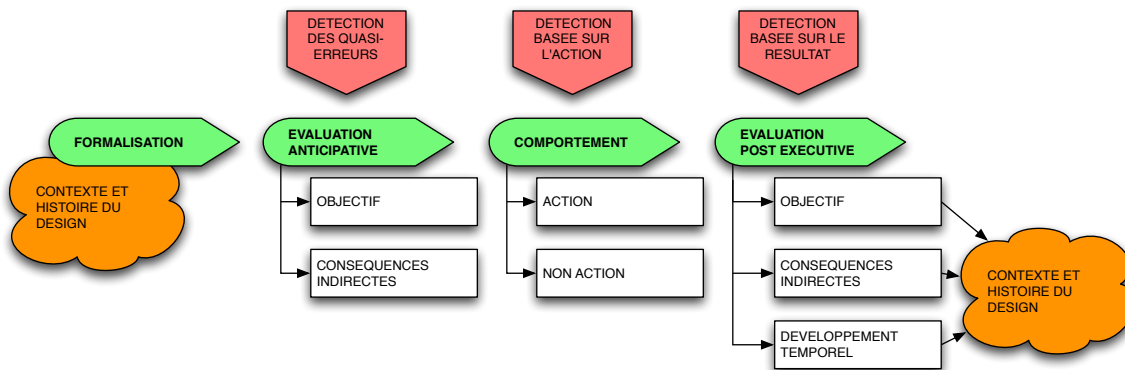


Figure 15

Modèle de décision et de détection de l'erreur en conception architecturale.

En se basant sur l'état actuel du contexte, le concepteur essaie de résoudre un problème local. Dans cette première étape, il identifie mentalement le sous-problème à résoudre, prévoit son action et identifie et formalise les conséquences attendues, c'est-à-dire l'objectif de son action. Il procède ensuite à une évaluation anticipative, préalable au dessin, pour estimer les conséquences de son action potentielle. Suivant les résultats de cette évaluation, le comportement du concepteur peut être l'action, par le dessin et la génération de solutions, ou la non-action, laquelle constitue

néanmoins un comportement qui aura un impact sur le contexte et l'historique de la conception. Le concepteur jauge ensuite les résultats de son comportement en rapport avec ses objectifs et observe les conséquences (évaluation post-exécutive) : il estimera l'écart entre les conséquences anticipées et les conséquences réelles. Certaines conséquences de son action ne seront pas décelées, soit car le concepteur manque de recul sur l'ensemble des contraintes, soit car la conséquence ne pose pas encore problème. Ce processus d'évaluation peut aussi conduire à de nouvelles découvertes, via la réinterprétation des esquisses par le concepteur (découvertes inattendues, voir chapitre 2, point 3.3).

Toutes ces conséquences ont inévitablement un impact sur le contexte.

- Les contraintes ont été modifiées : certaines ont été résolues, d'autres sont propagées, et de nouvelles peuvent avoir émergé.
- Les représentations de l'objet ont évolué. En cas d'action, les représentations externes ont été modifiées, mais dans tous les cas, les représentations internes ont évolué.
- L'historique de la conception a changé. Si le concepteur a décidé de ne pas agir, le contexte évolue tout de même. En effet, décider de ne pas modifier un élément de la conception mènera à l'apparition d'une nouvelle contrainte (temporaire ou définitive) : à cet instant l'élément sur lequel portait la décision ne peut pas être modifiée, ou en tout cas pas de cette manière. Si cela ne conduit pas, à proprement parler, à augmenter la précision de l'objet architectural, cela réduit néanmoins l'incertitude de la conception, en « fermant certaines portes ».

Dans ce modèle, les erreurs peuvent intervenir à plusieurs niveaux. Certaines erreurs au niveau de l'action sont des problèmes d'exécution (ratés). C'est le cas par exemple si le dessin est différent de l'intention. D'autres pourront être liées à de mauvaises évaluations (sur base de mauvaises règles, d'un manque de connaissance, ou de l'application erronée de ces règles ou connaissances). Une autre source d'erreurs peut provenir d'un défaut dans la rétention des différentes contraintes ou de l'historique de la conception.

La détection de l'erreur interviendra également à différents niveaux et moments :

- lorsque le concepteur formule son intention et évalue anticipativement les différentes conséquences (on parlera ici de « quasi-erreur ») ;
- dans le cours de l'action, où ce sont principalement les ratés qui vont être détectés ;
- après l'action, où l'évaluation post-exécutive permettra une détection basée sur les résultats. Si l'erreur n'est pas détectée à ce moment, elle pourra l'être par la limitation des fonctions qui interviendra plus tard.

Ce modèle, bien que conceptuel, nous apparaît utile dans le cadre de la conception. Premièrement, il montre son aspect opportuniste et la récursivité des activités d'analyse, de génération et d'évaluation de solutions. Deuxièmement, il permet de rendre compte du caractère mal-défini des problèmes de conception et adapte donc la réflexion sur l'erreur en fonction de ces caractéristiques. Troisièmement, il met en exergue le rôle central de la décision et de l'intention dans la conception, en adoptant une échelle très fine de description des activités cognitives. Enfin, il nous permet d'identifier des besoins d'assistance dans les phases de pré-conception. Ce sera l'objet du point 2.8 du présent chapitre.

2.7. Spécificités de la conception architecturale

Si les approches génériques de la conception nous renseignent précisément sur les processus cognitifs mobilisés dans les activités de conception au sens large, elles sont relativement réductrices et ne permettent pas de rendre compte des spécificités du domaine de l'architecture. Les modèles identifient des activités cognitives de l'ordre de la génération de solutions et de leur

évaluation, mais n'abordent pas spécifiquement des notions telles que le principe de concept, le rôle central du dessin, l'importance cruciale de l'intégration ou encore l'émotion apportée par le produit.

Nous estimons qu'à des fins de développement de systèmes d'aide, les activités de conception doivent avant tout être étudiées en rapport au domaine ou au métier dans lequel elle s'inscrivent. La conception architecturale a ainsi été étudiée pour ses spécificités dans le champ de l'ergonomie, du *design computing* et du *design cognition*.

Ces différents champs de recherche montrent que la conception architecturale, malgré ses nombreuses caractéristiques communes avec d'autres domaines de la conception (mécanique, logicielle, de produit, etc.), comprend aussi plusieurs spécificités. L'objectif de cette section est de décrire ces spécificités, afin de compléter et d'enrichir les modèles strictement cognitifs de la conception.

2.7.1. Caractère situé et complexe des problèmes architecturaux.

Un bâtiment est par essence une entité unique prenant place dans un contexte géographique et temporel donné. Ainsi, une construction doit répondre à un nombre conséquent de contraintes, qu'elles soient techniques (stabilité, performance énergétique, etc.), ergonomiques (confort, aspect fonctionnel, etc.), sociales (esthétique, émotion, innovation, etc.), économiques (coût de construction, de maintenance et d'utilisation) ou sociétales (urbanisme, climat, etc.). Chaque bâtiment doit aussi s'accorder avec les particularités du site dans lequel il s'inscrit.

Les productions architecturales sont donc extrêmement complexes, et nécessitent une forte intégration entre ces différents composants. Il faut intégrer dans la conception d'un bâtiment les différentes technologies le constituant, son économie à la construction et à l'usage, le confort d'utilisation, l'émotion qu'il doit susciter, etc. Il faut à la fois créer une œuvre unique, et qu'elle fonctionne.

Dans d'autres domaines de la conception, ce contexte est moins riche : la construction d'une pièce mécanique par exemple ne mobilisera pas de réflexions d'ordre esthétique ou émotionnelles et réduira au minimum les composantes sociales et ergonomiques pour mobiliser une réflexion essentiellement fonctionnelle, technique et économique. Dans d'autres domaines, comme le design d'objets, la réflexion sera essentiellement d'ordre esthétique, pratique et visera à susciter de l'émotion. Les aspects purement techniques, fonctionnels voire ergonomiques seront parfois mis de côté.

Vus la complexité de ses problèmes et leur caractère situé (variabilité des contextes selon les moments et les lieux), la conception architecturale est particulièrement guidée par la recherche de compromis, c'est-à-dire d'une solution *la plus satisfaisante* pour un contexte donné, alors que d'autres disciplines (comme la recherche scientifique ou certains domaines de la conception d'ingénierie) font appel à la notion de preuve et proposent d'effectuer les *meilleurs choix* (Visser, 2009b). En architecture, la quantité des contraintes, leur caractère parfois subjectif et l'étendue des problèmes rendent impossible toute tentative d'approche exhaustive. Des compromis guideront donc les choix de la meilleure conception.

Comme évoqué aussi, l'architecture est un art majeur. Elle vise à produire des résultats uniques et, tant que faire se peut, créatifs et innovants. L'architecture répond donc particulièrement aux critères de la créativité que sont la nouveauté, l'utilité et la temporalité (Akin & Akin, 1998). Ces critères montrent aussi l'aspect changeant du contexte : une conception optimale dans un contexte technologique et culturel donné pourra s'avérer être une aberration quelques années plus tard.

2.7.2. Absence de méthodes prescrites

Les différents domaines de la conception sont différenciés par l'existence de méthodes plus ou moins structurées. De ce point de vue, on pourra opposer la conception informatique et le design d'ingénierie, qui possèdent des méthodes et normes structurantes voire contraignantes, à la conception architecturale, qui ne possède pas de telles méthodes formelles (Akin, 2001, Détienne, 2006). La décomposition du problème en architecture est effectuée de manière *ad hoc*, plutôt que guidée par des méthodes structurées et formelles. L'aspect opportuniste de la conception se révèle donc plus important en architecture que dans d'autres domaines.

En outre, la complexité due au caractère situé de chaque bâtiment implique qu'il existe très peu, sinon aucune situation routinière de conception en architecture (Akin, 2001, Darses, 2004). Même en reprenant des éléments déjà existants, voire des solutions entières préalablement générées (comme dans le cas de maisons clé-sur-porte), il est nécessaire de les adapter aux particularités du site et demandes du client. Ainsi, la conception architecturale nécessite toujours la mise en place de nouvelles procédures, d'être créatif et d'innover.

Akin (2001) renseigne que les architectes professionnels ont une propension à l'utilisation des méthodes créatives et à la génération de nombreuses solutions alternatives même si le problème est très simple et structuré (voir aussi Akin & Akin, 1998). Ce n'est pas le cas dans d'autres domaines, comme pour la conception de circuits intégrés, pour laquelle Ball, Maskill & Ormerod (1997, cité par Akin 2001) a montré au contraire un nombre remarquablement bas de solutions alternatives générées. Cette habitude de mettre en place des solutions créatives pour des problèmes simples serait propre à l'architecture et dictée par un climat, intériorisé dès le début des études, récompensant voire glorifiant l'innovation et la créativité (Akin, 2001). Alors que dans la plupart des métiers, la reconnaissance est plutôt basée sur la fiabilité, l'architecture, au contraire, semble cultiver les valeurs que sont la nouveauté et de la créativité (Eisenberger & Rhoades, 2001, cité dans Stokes, 2009).

2.7.3. Nature et diversité des représentations.

L'architecture fait appel à des représentations de natures variées (Akin, 2001, Détienne, 2006). En particulier, alors qu'une grande partie des disciplines technico-scientifiques font appel à des représentations symboliques (liste de propriétés, tableurs, etc.) d'un objet pour en faire des simulations, l'architecture sollicite autant, voire plus de représentations analogues à la réalité, c'est-à-dire possédant des propriétés topologiques ou géométriques correspondant à l'objet figuré¹⁸. Ces représentations analogues sont à la base de nombreux comportements de simulation et d'évaluation et sont nécessaires pour intégrer les solutions partielles.

Compte tenu du caractère extrêmement contextuel de toute conception en architecture et de la diversité possible, l'efficacité d'une conception en architecture doit être démontrée en se basant sur ce que Akin (2001) appelle la *persuasion située*. C'est-à-dire que l'architecte doit persuader les autres de la qualité de son design, et que cette persuasion est basée sur un contexte spécifique. A cet effet, il lui est nécessaire de varier les formats de représentations : modèles 3D, esquisses, plans, représentations techniques des performances, etc. « *Architecture is a representation saturated problem domain* » (Akin, 2001, p. 7).

¹⁸ A noter que ce caractère analogue n'implique pas *de facto* que les représentations soient aisées à comprendre. Les plans d'architectes ne sont compréhensibles que par une minorité de la population.

2.7.4. Représentation de la troisième dimension

Le phénomène gravitationnel implique des caractéristiques physiques particulières dans le fonctionnement d'un bâtiment. En effet, à de rares exceptions près, un bâtiment possède des murs verticaux et des planchers horizontaux. Ce qui pourrait paraître anecdotique est cependant fondamental pour l'activité de l'architecte. Une représentation en deux dimensions d'un bâtiment peut contenir quantité d'informations concernant sa troisième dimension. C'est ainsi que l'architecture utilise comme support privilégié la projection parallèle, sur laquelle la dimension perpendiculaire (hauteur pour le cas d'un plan ou profondeur dans le cas des coupes ou élévations) peut être inférée avec de simples annotations. Un plan peut en principe se suffire à lui-même. En architecture, les modèles 3D interviennent généralement plus tard dans le processus et/ou principalement à des fins de démonstration¹⁹. Une autre implication notable est que les esquisses et plans sont assez codifiés (notamment afin de rendre compte de la troisième dimension sur un dessin en deux dimensions), et donc aisément interprétables par un agent logiciel.

Ce n'est pas le cas du design d'objets pour lequel la troisième dimension est capitale. Dans le design industriel, des modeleurs 3D parfois très sophistiqués doivent être utilisés très tôt dans le processus de conception. La phase créative se fait donc parallèlement sur papier et sur modèle 3D. Elsen & Dawans (2010) ont ainsi montré que les modèles 3D fournissent un soutien fort à l'idéation en design industriel. Les auteurs ont aussi montré que de nombreuses esquisses sont tracées en perspective, ce qui rend plus difficile leur interprétation par système informatique.

2.7.5. Rôle central de l'activité de dessin

La particularité de l'architecture tient aussi au rôle central de l'activité de dessin. Comme nous l'avons déjà évoqué, la conception passe par la création de représentations externes de l'objet à concevoir (voir chapitre 2, point 3.2 pour plus de détails). Une spécificité de l'architecture, partagée avec le design industriel, est que le dessin, notamment à main levée, est une pratique courante et élaborée. Les architectes sont formés au dessin durant cinq ans dans les écoles d'architecture. Leurs productions graphiques comportent des aspects esthétiques et sont souvent bien plus élaborées que dans d'autres domaines.

Dans d'autres disciplines, comme l'ingénierie ou le développement informatique, le dessin n'est ni figuratif ni esthétique. Le travail graphique à main levée consiste tout au plus en des schémas synthétiques ou des annotations²⁰.

2.7.6. Rôle central du concept

La notion de « concept » du bâtiment, ou « parti architectural » prend souvent une place prépondérante en tant qu'élément de contrainte imposée par le concepteur. Bien souvent, la qualité du concept confèrera au bâtiment une valeur aux yeux de tous. La qualité du concept pourra faire qu'un bâtiment dépasse le statut de réalisation technique pour acquérir celui d'œuvre d'art.

¹⁹ A noter que certains modeleurs 3D sont spécifiquement conçus pour la pré-conception architecturale, avec plus ou moins de succès. Nous en discutons dans la section consacrée aux instruments de dessin en architecture (voir point 3.1).

²⁰ Bien entendu, nous n'excluons pas à ce sujet la possibilité de préférences personnelles. Certains architectes dessinent peu ou pas du tout, alors que certains ingénieurs ont des capacités d'expression graphique importantes.

Le concept possède un rôle central dans l'activité cognitive de l'architecte. Heylighen & Martin (2002) ont montré qu'il était une notion diffuse en architecture, mais structurant toute l'activité de conception. Le concept du bâtiment, dans la pensée du concepteur, prend le rôle d'un ensemble de contraintes et oriente donc les raisonnements. Ce concept émerge de la situation par un jeu d'inférences inductives qui vont progressivement le former. C'est d'ailleurs la combinaison d'un concept fort et d'une adaptation au contexte qui va caractériser la « bonne » architecture.

Ce rôle central du concept est partagé par certaines disciplines de la conception, principalement le design industriel, mais interviendra moins, voire pas du tout, dans d'autres disciplines comme la conception de pièces mécaniques.

2.7.7. Rôle central des analogies

En architecture, compte tenu du caractère extrêmement situé de chaque projet de conception et de ses aspects créatifs, il est nécessaire pour les concepteurs d'adopter des démarches de raisonnement analogique, qui sont des moyens de pensée courants et fréquents en particulier dans ce domaine (Leclercq & Heylighen, 2002). Nous ne revenons pas sur les spécificités du raisonnement analogique, décrites précédemment (voir point 2.2.3).

2.8. Assistance à la conception

En nous basant sur la description des activités cognitives impliquées dans la conception architecturale, nous pouvons identifier plusieurs moyens de soutien informatisé à cette activité.

D'abord, rappelons que nous nous adressons à la conception préliminaire en architecture, pour laquelle il y a un véritable enjeu. En effet, la phase amont du processus occupe peu de temps dans le cours de la conception mais elle engage l'essentiel des décisions et des coûts globaux. Les propositions que nous formulons ci-après sont destinées à ce cas particulier (quoique probablement applicables à d'autres disciplines et/ou à d'autres phases). Cela exclut donc *de facto* les logiciels de simulations précises de tous types (thermique, acoustique, etc.). Ces derniers sont en effet basés sur l'utilisation de modèles complets de bâtiments et sont donc adaptés à des phases de *production*, lorsque le bâtiment est entièrement défini (voir figure 1). A noter aussi que nous n'abordons, à ce stade, que la situation de conception individuelle. La conception collaborative sera envisagée dans le point 4 de ce chapitre.

Ensuite, compte tenu du rôle central du dessin et du plan en conception, rappelons que l'aide au dessin technique est aussi un élément essentiel de l'assistance à la conception. Mais nous n'aborderons pas cette catégorie d'aide, attendu que ce rôle est déjà bien rempli par les nombreux logiciels de DAO et de CAO, lesquels ont déjà entièrement supplanté la table à dessin dans toutes les agences d'architecture, quels que soient leur taille ou l'ampleur de leurs projets. Néanmoins, ces outils possèdent des limites que nous décrirons au point 3.1, consacré aux instruments de dessin en architecture.

Enfin, cette section ne vise pas à faire un état de l'art exhaustif de l'aide à la conception préliminaire : les approches sont extrêmement variées et les logiciels, scientifiques ou commerciaux, s'avèrent très nombreux. Elle vise plutôt à dresser une « carte » des différentes possibilités d'aide à la conception et des différents besoins, en vue de situer l'approche du LUCID et des logiciels d'esquisse numérique que notre laboratoire développe.

Nous pouvons donc identifier plusieurs classes d'aide : l'aide à la formulation du problème, l'aide à la génération de solutions, l'aide à l'évaluation et l'aide à la détection et récupération de l'erreur. Nous aborderons aussi les facteurs potentiellement bloquants dans les approches logicielles en pré-conception.

2.8.1. Aide à la structuration du problème

Il s'agit d'aider le concepteur à se définir une vision claire du problème.

Tout d'abord, des aides peuvent permettre l'émergence de toutes les contraintes **complétant le cahier des charges**. A ce titre, il est intéressant de citer l'aide à l'identification des besoins, qui s'effectue principalement sur base de méthodes structurées d'analyse (Darses *et al.*, 2001). Leur enjeu est de proposer des méthodes qui tiennent compte des spécificités de l'*activité* de conception, à savoir le développement conjoint des solutions et des évaluations, ainsi que l'utilisation de bas niveaux d'abstraction dès le démarrage du processus. Pour ce faire, les analyses et modélisations de l'activité, les méthodes de conception participatives ou encore les *scenario-based design* ont été largement développés. Néanmoins, dans le domaine de l'architecture, ces méthodes sont encore peu répandues (voir Martin, 2004 pour l'approche globale de l'ergonome dans les projets de conception).

Un autre élément de l'aide à la structuration du problème consiste à permettre à l'architecte de **changer son point de vue** sur l'objet architectural, c'est-à-dire identifier d'autres parties du contexte, rendre explicites des contraintes ou encore avoir d'autres représentations de l'objet. C'est en effet par l'adoption de points de vue complémentaires que peut être structuré efficacement l'espace-problème (Darses, 1992). Les points de vue complémentaires sont aussi impliqués dans la créativité (Akin & Akin, 1998). Fournir de l'aide extérieure pour permettre ces changements de points de vue est une opportunité de soutien à la conception (Bonnardel, 2000). Dans ce sens, un système informatique peut par exemple fournir des informations sur l'objet qui ne sont pas explicites, proposer des représentations alternatives de l'objet en cours de conception ou encore proposer des modeleurs rapides permettant de représenter sous une autre forme le produit de la conception dès les phases encore peu avancées du processus d'idéation.

Enfin, d'autres méthodes, relatives à la capitalisation de **bonnes pratiques** en conception architecturale, proposent une approche plus générique, basée sur l'exemple. Des guides très connus tels que ceux de Neufert²¹ et de Ching²² recensent de nombreuses données permettant d'aborder des problèmes de conception nouveaux : dimensionnement des espaces, configurations standard, etc. Ils permettent de structurer l'approche en fonction du domaine d'application.

2.8.2. Aide à la génération de solutions

L'aide à la génération de solutions passe principalement par le support au raisonnement analogique et à l'émergence du concept. La fourniture de **sources d'inspiration** semble être une approche pertinente. De nombreux travaux proposent une approche à base de cas (*case-based design*) pour soutenir la conception. Il s'agit de permettre à l'architecte d'identifier et de retrouver des sources et des références avec, en entrée, des critères plus ou moins variés.

²¹ Voir par exemple Neufert, E. & Hoyet, J-M. (Eds.). (2010). Les éléments des projets de construction - 10e édition revue et augmentée. Paris : Dunod

²² Voir par exemple Ching, F. (2009). Guide technique et pratique de la construction - 2e édition. Montréal : Modulo.

L'aide à la génération de solutions passe aussi par la possibilité de créer de **nouveaux modes de représentations** et d'utiliser de nouvelles formes de raisonnements spatiaux. Les modeleurs paramétriques (voir Oxman, 2006) poursuivent cet objectif d'étendre les capacités de génération de solutions formelles par des approches originales. Il existe de nombreuses approches pour permettre la génération de formes : des approches par règles, par topologie ou encore avec des algorithmes de simulation et d'optimisation. Nous n'entrons pas dans le détail ici, notamment car ces outils ont principalement pour cible l'architecture non conventionnelle et sont encore peu répandus en dehors des laboratoires de recherche.

De la même façon que pour l'aide à la formulation du problème, le support à la **gestion des différentes contraintes**, à leur explicitation, à l'identification de leurs propagations sont aussi des éléments importants de la génération de solutions.

2.8.3. Aide à l'évaluation de solutions

Un autre soutien important consiste à aider les concepteurs à évaluer le caractère pertinent du produit en cours de design. Pour pallier aux connaissances évaluatives limitées des concepteurs, les assistances à l'évaluation de performance doivent tenir compte du caractère ouvert des problèmes de conception. Ainsi, il ne s'agit pas de proposer des solutions prédéfinies, limitant l'étendue des possibles, mais bien de procurer des ressources à l'évaluation en **complétant les connaissances évaluatives** dans le domaine du concepteur ou dans des domaines connexes (Bonnardel, 1999). Ces aides doivent fournir d'autres points de vue sur l'objet, ainsi que des aides « précoces » et « contextuelles ». Bonnardel & Sumner (1996) proposent l'utilisation de « systèmes critiques » pour l'aide à la conception. Ces systèmes adoptent une démarche coopérative vis-à-vis du concepteur, leur renvoyant un *feedback* évaluatif sur les solutions générées (Voir Oh, Do & Gross 2004 pour un exemple de système permettant de critiquer les adjacences d'un bâtiment). Le rôle de ces systèmes est d'analyser les solutions et d'en réaliser une critique en identifiant des situations pouvant poser problème, en communiquant des problématiques autour d'une solution, et en aidant l'utilisateur à changer de point de vue. L'idée est d'augmenter les capacités évaluatives du concepteur, tout en lui laissant la responsabilité de la décision. L'enjeu de ces systèmes est de fournir des critiques appropriées et adaptées aux premières étapes de la conception (lorsque l'objet est encore fou et mal défini) et ce, de manière non-intrusive. Cependant, ces systèmes restent souvent au stade conceptuel, et les quelques essais d'implémentation portent souvent sur des critères relativement sommaires.

Certaines approches tentent aussi de **prendre en compte la complexité des processus** de conception et des difficultés d'évaluation inhérentes à la quantité de contraintes. Les approches multicritères permettent par exemple de forcer l'explicitation des critères d'évaluation, d'évaluer leur pondération et de définir les meilleures orientations d'un projet.

D'autres pistes consistent à fournir des **représentations complémentaires de l'objet** ou à simuler son fonctionnement, en vue d'enrichir la base sur laquelle les évaluations portent. Il ne s'agit plus d'apporter une information critique sur l'objet ou au concepteur, mais de permettre à ce dernier d'appréhender le produit de façon différente, lui permettant de formuler lui-même ses propres critiques. En ouvrant les perspectives et en multipliant les points de vue sur l'objet, il est possible de fournir une aide à la détection des erreurs et à l'identification des différentes conséquences des actions. Un logiciel peut ainsi apporter un point de vue particulier sur l'objet (thermique, acoustique, structurel, esthétique ou autre).

Pour la récupération des erreurs, des aides permettant de **conserver un « historique » du design** peuvent être appropriées. A ce sujet, Darses *et al.* (2001) proposent que l'aide à la conservation des logiques de conception soit un enjeu du soutien à la conception. Il s'agit ici

d'archiver les raisons qui poussent les concepteurs vers tel ou tel choix, pour faciliter et systématiser les réutilisations. Ces systèmes sont cependant peu réalistes dans le domaine de l'architecture, compte tenu du caractère extrêmement complexe des problèmes.

2.8.4. Limites des approches d'aide à la conception préliminaire

Il convient aussi d'évoquer les difficultés, limites et pièges des approches tentant d'outiller la conception préliminaire en architecture.

Une première limite est liée aux spécificités de l'objet architectural dans les étapes créatives de la conception : celui-ci est flou, mal défini, ambigu et changeant. Cet état de fait rend difficile sa représentation ou sa modélisation par un logiciel, et donc complique toute approche visant à appréhender l'objet et à apporter une expertise ou des informations pertinentes à sa conception. De même, ces caractéristiques rendent ardues voire impossible la description précise et complète de l'objet par le concepteur, ce qui reporte automatiquement aux phases aval de la production l'utilisation d'outils nécessitant cette exhaustivité dans la description.

D'autre part, les logiciels se doivent de respecter le caractère opportuniste de l'activité de conception. L'échec des instruments de CAO à assister la pré-conception tient au fait que ces outils imposent une structure sémantique et un schéma procédural qui ne conviennent pas au caractère intrinsèquement récursif de la conception. Nous y reviendrons en détail dans la section suivante. Le même constat peut être fait sur les méthodes formelles de conception qui, bien souvent, ne prennent pas en compte cette organisation spontanée de l'activité.

Malgré leur inadaptation à l'étape créative de la conception, certains logiciels de CAO sont pourtant utilisés dans des phases précoces. Ils y sont souvent détournés de leur usage premier. Dans ce cas, leurs contraintes opérationnelles changent inévitablement le processus de conception, réduisant les possibilités créatives, donc de recherche conceptuelle. Il convient dès lors d'adapter spécifiquement les logiciels d'aide aux caractéristiques des étapes de conception préliminaire.

Synthèse

Dans cette section, nous avons évoqué les différents modèles de la conception. Nous avons décrit les différents composants de cette activité, en nous basant principalement sur le paradigme le plus référencé dans la littérature, à savoir la conception vue comme la résolution de problèmes flous. Cette vision nous permet de saisir les principales activités cognitives impliquées dans un exercice de conception, à savoir la formulation du problème, la génération de solutions, la gestion des contraintes, le raisonnement analogique et les activités d'évaluation. Nous avons aussi discuté du lien qu'entretiennent la conception et la créativité.

Cette section a aussi insisté sur le caractère complexe et situé de la conception, particulièrement dans le domaine de l'architecture. Celle-ci est loin d'être un processus mécanique de résolution de problèmes. Son caractère opportuniste, la récursivité du raisonnement et le statut particulier des erreurs en conception nous ont invité à proposer un modèle de prise de décision locale en architecture.

Nous avons ainsi listé les particularités de la conception en architecture : la diversité des contraintes, le rôle central du dessin, le caractère extrêmement situé de la conception, l'absence de méthodes prescrites, la diversité des représentations, les spécificités de l'approche volumique, et le rôle central des analogies.

En conclusion, nous avons proposé diverses pistes pour l'aide à la conception et avons critiqué les outils actuels dits de « conception assistée ».

La conception architecturale est donc un processus complexe, faisant appel à de nombreux modes de raisonnement et possédant un caractère situé. Les représentations externes de l'objet (plans, modèles, maquettes, etc.) jouent un rôle essentiel dans les différentes activités cognitives mobilisées pour la conception. Ces représentations et leurs rôles font l'objet de la section suivante.

3. Les représentations externes en conception architecturale

Ce chapitre aborde spécifiquement les modes de représentation de l'objet existant dans le domaine de la conception architecturale. Une première section vise à comparer les différents outils de représentation propres au domaine. Nous proposons ensuite une taxonomie des différentes dimensions qui permettent de caractériser les représentations externes en architecture. Nous décrivons ensuite les caractéristiques et propriétés de l'esquisse à main levée en conception.

3.1. Instruments pour le dessin

Le domaine du dessin d'architecture est outillé par un foisonnement de logiciels scientifiques et commerciaux qui coexistent avec de nombreux outils traditionnels. Nous en dressons ici plusieurs catégories.

Premièrement, on retrouve les logiciels de **dessin assisté par ordinateur** (DAO). Ces outils, tels qu'Autocad ou Archicad, sont répandus dans tous les bureaux d'architecture en vertu de leurs nombreux avantages : une précision dans le dessin, une cohérence géométrique, des fonctions d'édition et surtout la création d'un modèle numérique. Ainsi le plan n'est plus astreint à la feuille de papier et devient un objet immatériel qui est dupliquable, archivable et partageable simplement et efficacement. Les dessins issus de ces logiciels de DAO sont des descriptions explicites de l'objet architectural sous forme graphique et géométrique. Dans ce sens, ces outils ne diffèrent pas réellement de la table à dessin : leur grand avantage réside surtout dans la création d'un modèle numérique et les fonctions d'édition qu'ils proposent.

Une autre catégorie est relative à la **conception assistée par ordinateur** (CAO). Il s'agit d'instruments visant à créer un modèle du bâtiment, possédant une certaine sémantique. Ces modèles CAO ont une visée prédictive : le modèle construit permet d'alimenter une série d'évaluateurs et de faire tourner des simulations, parfois très complexes et précises. C'est ainsi que l'on pourra précisément déterminer l'efficacité énergétique d'un bâtiment sur base des plans, évaluer sa performance structurelle, optimiser sa réalisation, calculer ses coûts, etc. Les différents outils informatiques d'aide à la conception en architecture peuvent fournir des modèles digitaux aux propriétés et possibilités différentes (Oxman, 2006).

Néanmoins, ces outils sont principalement, voire exclusivement, des outils de production : malgré l'abondance sur le marché d'outils de CAO et de DAO, les architectes commencent encore leurs projets en accordant une préférence au papier-crayon. Le transfert de leur production vers un outil informatisé se déroule généralement à la fin de la phase créative de conception. Ce phénomène est imputé au haut niveau de précision et au manque d'ambiguïté que ces outils numériques exigent et qui freinent la liberté et l'abstraction nécessaires aux phases précoces de la conception (Goel, 1995, Goldschmidt, 1991, Suwa, Gero, & Purcell, 1998). Dessiner à l'aide d'outils CAO/DAO implique, à partir d'un panel de possibilités définies dans un menu, de sélectionner un outil, placer et positionner l'objet dans le canevas et définir les opérations à exécuter sur l'objet. Ces outils reposent sur un mode d'interaction requérant une explicitation complète des actions à effectuer. Cette façon de travailler s'écarte des environnements traditionnels – crayon, papier ou tableau – dans lesquels l'utilisateur choisit un outil et traduit ses idées librement, sans être contraint à des modalités de travail prédéfinies. Leur modèle conceptuel est exclusivement tourné vers la production : celui-ci manipule des notions purement constructives (mur, dalle, etc.), alors que les

architectes manipulent en phase d'idéation des notions telles que des espaces, des frontières, des ambiances, etc. Un récent courant de recherche dans le domaine des BIM (*Building Information Modelling*) vise à intégrer les différents évaluateurs dans des modèles « universels » des objets architecturaux.

A l'inverse cependant, les systèmes numériques offrent des avantages sur le papier-crayon tels que des facilités d'enregistrement et de stockage, une durabilité et une permanence de la représentation, des méthodes rapides de recherche pour des éléments stockés (McGown, Green & Rodgers, 1998).

Ainsi, une autre classe d'outils toujours privilégiés à l'heure actuelle recouvre toute une série d'**instruments graphiques traditionnels** (crayons de différents types, stylos, feutres, surligneurs, gommes, etc.) et de supports (papiers de différents formats et différentes épaisseurs, calques semi-transparents, voire des supports improvisés comme le dos d'une enveloppe, Gross & Do, 2000). Par simplicité, nous rangerons tous ces outils dans une catégorie que nous nommons « papier-crayon ». Dans le domaine de l'architecture, le dessin est souvent considéré par les architectes comme un outil versatile, rendant possible tous les styles et toutes les compositions. La représentation sur papier offre une grande clarté à la conception et le stylo est un instrument très flexible. Selon Graves (1981, cité par Schweikardt & Gross, 2000), « la tension des lignes sur le papier possède une prégnance qui décrit des possibilités qui ne pourraient être imaginées seulement dans la pensée ». Le crayon, en tant qu'outil de conception, permet une interaction implicite avec la représentation et s'adapte *ipso facto* aux étapes créatives et préliminaires de la conception.

Une quatrième catégorie d'outils a trait aux **modeleurs « géométriques »** dans la conception, dont Google SketchUp est un des plus répandus. L'utilisation de ces outils n'a pour but que de créer un modèle visuel de l'objet architectural. Le modèle est dépourvu de sémantique et peut se révéler incohérent, pourvu que ses propriétés visuelles soient mises en avant. C'est ainsi que nous avons montré que les modèles produits par ces outils sont bien souvent cantonnés à ce rôle visuel mais s'avèrent inutilisables en entrée à des outils de simulations (Dawans, Demaret, Safin, Schmitz, & Leclercq, 2009). Ces outils peuvent être utilisés en phase de production pour dépeindre une image réaliste du bâtiment à construire mais peuvent aussi, dans une moindre mesure, assister la conception créative en permettant la représentation relativement rapide d'éléments en trois dimensions (modèles 3D) ou de documents visuels photoréalistes (comme l'intégration d'une esquisse dans une photo du site). Ainsi, la facilité d'utilisation de certains de ces modeleurs et leurs capacités graphiques rendent possible leur utilisation pour les phases de créativité (Hannibal, Brown, & Knight, 2005).

En outre, on trouve aussi en support à la conception créative les différents outils et matériaux permettant de créer des **objets-maquettes** : paires de ciseaux, *cutters*, feuilles de cartons, plaques de contreplaqué. Même si ces maquettes tendent à disparaître au profit des modeleurs numériques, certains architectes continuent à les utiliser. Elles procurent en effet un espace de simulation tangible²³ et permettent d'évoquer particulièrement facilement les effets de la lumière (Van de Vreken & Safin, 2010).

Enfin, différents **outils de modélisation spécifique** existent pour des besoins particuliers dans les projets d'architecture. C'est ainsi que nous avons contribué au développement d'outils de modélisation pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments et pour la

²³ Voir à ce propos le documentaire « Esquisses de Franck Ghery » de Sydney Pollack en 2006. Celui-ci montre que le célèbre architecte du musée Guggenheim de Bilbao et de l'Opéra Walt Disney de Los Angeles commence sa recherche formelle par le découpage et l'assemblage de pièces de maquettes. Ces maquettes sont ensuite numérisées à l'aide de scanners 3D spécifiques et fournissent une base à la modélisation complète et aux différents calculs de structure.

performance acoustique des salles (Dawans *et al.*, 2009, Juchmes, Dawans *et al.*, 2009). Nous avons montré que la spécificité des caractéristiques géométriques et technologiques de ces modèles, ainsi que les activités de conceptualisation et d'interprétation qu'elles mettent en jeu, invitent à développer des outils spécifiques pour la modélisation. De nouveau, ces modeleurs sont principalement utilisés dans les phases en aval de la conception, lorsque l'objet est déjà amplement spécifié.

De plus, depuis une vingtaine d'années, on assiste à l'émergence de quantité de logiciels de plus en plus sophistiqués et élaborés pour permettre la recherche formelle et conceptuelle sur une base autre que géométrique (Oxman, 2006). Sans prétendre à une revue exhaustive, nous citons plusieurs principes différents. Dans les modeleurs paramétriques, l'objet architectural n'est pas décrit de manière strictement graphique ou géométrique, mais obéit à un certain nombre de règles. Ces modèles peuvent générer dynamiquement des formes sur base de descriptions topologiques du bâtiment ou de géométries associatives. D'autres modeleurs permettent la génération et l'exploration de solutions sur base d'algorithmes génétiques ou sur base de grammaires de formes. Des logiciels permettent aussi de concevoir le modèle du bâtiment avec, en entrée, des critères de performance. Même si certains reconnaissent la possibilité d'utiliser ces systèmes en tant qu'instruments de conception préliminaire, ces outils de future génération ne sont cependant pas encore très répandus dans les agences d'architecture, et restent donc plutôt cantonnés au domaine de la recherche ou dans des grands bureaux d'architecture non conventionnelle. Ces modèles varient selon le degré d'explicitation et le focus de l'interaction qui, selon Oxman (2006), peut en effet porter sur la représentation elle-même, mais aussi sur le processus génératif, sur la performance ou sur l'évaluation. Nous n'entrons pas dans les détails de ces techniques particulières, car elles sortent du cadre de ce travail.

3.2. Objets de la conception : esquisses, modèles et dessins numériques

En corollaire à la vaste gamme d'outils dont il dispose, l'architecte peut user, pour la transmission de l'information relative à son bâtiment, de plusieurs modes de représentation graphique d'un espace : l'esquisse, le plan technique, le modèle 3D, la maquette, la peinture, etc. Selon ses objectifs, les moyens dont il jouit et les personnes auxquelles il s'adresse, l'architecte utilise plusieurs de ces méthodes. S'il est difficile de dresser une liste exhaustive de ces modes de représentations, nous avons récemment proposé (Van de Vreken & Safin, 2010) une série de dimensions permettant de distinguer les types de représentations en architecture et leurs usages. Chaque représentation peut donc être caractérisée sur les sept dimensions suivantes.

Analogue ou symbolique (Akin, 2001). Une représentation analogue à la réalité possède une ressemblance plus ou moins directe avec l'objet figuré, selon le degré de précision souhaité. Ces modèles analogues de l'objet rendent possible la simulation d'un certain nombre de comportements et l'évaluation d'une série de critères comme par exemple la constructibilité, l'adaptation au contexte ou la composition. A l'inverse, une représentation symbolique est une représentation abstraite de la réalité, sans rapport topologique direct avec celle-ci et utilisant des symboles pour signifier les entités qu'elle contient. On trouvera dans cette catégorie les schémas, diagrammes, tableaux, etc. Ces représentations symboliques permettent des évaluations de comportements physiques (performance énergétique, acoustique, etc.) qui nécessitent un relatif niveau d'abstraction dans la description de l'objet (Akin, 2001). Différents niveaux intermédiaires sont possibles. C'est ainsi qu'une partie conséquente des travaux du LUCID consiste à fournir des outils permettant d'utiliser des moyens analogiques pour décrire et construire des représentations symboliques (voir Dawans *et al.*, 2009 pour la simulation acoustique et Juchmes, Delfosse *et al.*, 2009 pour la simulation énergétique).

Visuelle ou multimodale. La représentation visuelle, représentation presque exclusivement utilisée en architecture actuellement, ne fait intervenir que le mécanisme de perception visuelle chez l'observateur, les autres informations perceptives étant construites et inférées à partir des données visuelles. L'observateur garde donc une distance vis-à-vis du modèle représenté, bien qu'une certaine projection mentale dans l'espace soit possible. A l'inverse, une représentation multimodale, en faisant intervenir plusieurs mécanismes de perception chez l'individu, a pour but de fournir un plus haut degré d'immersion dans l'espace représenté. Les dispositifs de réalité mixte poursuivent comme objectif le développement des modes de représentations multimodaux. Certaines d'entre elles, comme développées dans le projet IP City (Basile & Terrin, 2007) visent à fournir une représentation d'un futur bâtiment sur le lieu même de sa future construction. Grâce à ce système, le spectateur peut comprendre l'ouvrage non seulement dans une perspective visuelle, mais aussi dans une perspective plus globale, notamment par l'appréhension des ambiances.

Synthétique ou expressive. Les représentations en architecture varient par leur pouvoir expressif. Certaines cherchent à exprimer un point de vue technique sur l'objet architectural, alors que d'autres cherchent avant tout à simuler son usage ou son esthétique. C'est ainsi que la présence de couleurs, de gradients de textures, d'ombrages, d'éléments décoratifs, d'ameublements, etc. augmente le pouvoir évocateur de la représentation et que des sensations tactiles pourront être simulées visuellement notamment par la présence de textures. Cette distinction n'est pas nouvelle : depuis toujours, on distingue les représentations géométrales, techniques, des représentations pittoresques, sensibles (Drozd & Amphoux, 2008). Néanmoins, les moyens modernes de la CAO (Conception assistée par ordinateur) permettent de combiner ces deux extrêmes et autorisent une grande variabilité du pouvoir expressif. A noter que pour l'architecte, une représentation expressive n'est pas nécessairement gage de qualité, notamment car elle est souvent bien plus coûteuse à produire. Une maquette blanche pourra s'avérer, selon l'objectif, bien plus utile qu'un modèle 3D très élaboré.

Univoque ou ambigüe. Dans le même ordre d'idées, on distinguera les représentations en fonction de leur degré d'univocité. A une extrémité, se situe le plan technique. Répondant à une logique de communication, il cherche à représenter l'objet architectural sans aucune ambiguïté : les différents corps de métiers engagés dans une construction doivent partager strictement la même information sur l'objet. A l'autre extrémité, on retrouve l'esquisse papier. Répondant à une logique de conception, elle soutient la créativité en laissant une place importante à l'ambiguïté et à la réinterprétation, et en étant un vecteur de communicant d'intentions (Goel, 1995, Leclercq & Eisen, 2007). L'univocité des représentations passe par l'usage de conventions structurées dans leur expression graphique (Schmidt & Wagner, 2004). Un plan d'exécution, pour être compris par tous les intervenants, doit faire appel à des conventions structurées pour permettre l'échange « universel » des informations qu'il véhicule. Les représentations ambigües feront généralement appel à des modes d'expression *ad hoc* et propres à leur auteur.

Interactive ou contemplative. Les représentations interactives créent un rapport de réciprocité entre l'action de l'observateur sur l'espace représenté et la réponse de la représentation : une maquette en carton ou modélisation 3D que l'on manipule sont interactives. A l'inverse, les représentations dites contemplatives invitent l'observateur à fixer son attention sur l'objet représenté sans interagir avec ce dernier (dessin en perspective ou film d'animation par exemple).

Immersive ou émerasive. On parlera de représentation immersive quand elle place l'observateur entièrement ou partiellement dans l'espace représenté : bande vidéo simulant un parcours dans un bâtiment, visite virtuelle, etc. La représentation pourra créer l'illusion du mouvement chez l'observateur (bien que ce mouvement ne soit pas toujours libre : vitesse de déplacement, choix du cheminement, etc.). Elle est donc capable de restituer une expérience spatiale en plongeant l'observateur dans l'espace représenté. A l'inverse, la représentation émerasive place l'observateur en dehors de l'espace représenté : le plan et la maquette, par exemple, adoptent ce point de vue.

2D ou 3D. On distingue trois catégories pour l'insertion de la troisième dimension dans la représentation.

- La représentation 2D qui ne communique à l'observateur que des informations sur l'organisation des formes, si bien qu'il est souvent nécessaire de recourir à plusieurs représentations de ce type pour traduire la tridimensionnalité de l'espace considéré. La représentation 2D la plus utilisée en architecture est le dessin en projection parallèle tel que le plan, la coupe ou encore l'élévation. C'est par la combinaison de ces plans et coupes que peut être représentée la troisième dimension de l'espace. A noter que pour des projets d'architecture courante, ces représentations en 2D peuvent généralement suffire.
- La représentation 3D sur support 2D qui adjoint à l'organisation des formes des indices de profondeur. Pour y arriver, on peut soit ajouter à la représentation 2D un ou plusieurs indicateurs graphiques de profondeur (ombrages, variations de textures, etc.), soit utiliser un autre système de projection que la projection parallèle pour obtenir une représentation en perspective (axonométrique, oblique ou conique), soit encore utiliser des modèles 3D informatiques, affichés sur un écran en deux dimensions.
- La représentation 3D qui donne à l'utilisateur une information complète sur la tridimensionnalité de l'espace représenté. Il s'agit de la maquette. Le développement croissant des systèmes d'affichage en trois dimensions (cinéma 3D, télévision 3D) permettra probablement rapidement d'afficher des modèles de bâtiment en rendant « réelle » la troisième dimension.

Chacune de ces dimensions constitue plus un continuum qu'une dichotomie. De nombreux types de représentations sont donc possibles et une même représentation pourra être caractérisée différemment en fonction du contexte ou de l'usage qui en est fait. Par exemple, la même maquette sera qualifiée d'interactive si elle peut être manipulée, démontée et remontée, tandis qu'elle sera jugée contemplative si elle est placée dans une vitrine.

Les représentations les plus fréquentes en architecture sont l'esquisse, le diagramme, les plans (d'avant-projet ou d'exécution), le modèle 3D synthétique, les infographies photo-réalistes, les modèles 3D photo-réalistes (visites virtuelles) et la maquette en carton. L'usage de ces différents types de représentations dépend des objectifs de l'architecte (démontrer un concept, proposer une idée, vérifier la faisabilité, etc.), de ses interlocuteurs (clients, collègues ou lui-même) et de ses moyens (compte tenu de leur coût et de leur complexité, la réalité virtuelle et la réalité augmentée sont peu utilisées dans le domaine de la pratique architecturale courante). Bien entendu, de nombreuses représentations en architecture sont hybrides. C'est ainsi que l'on trouvera des plans annotés par des croquis ou schémas et des modèles 3D insérés dans des photos aériennes (photoréalistes et en 2D).

Les différents types de représentations ont des capacités variées de figuration de l'espace, en fonction de leurs caractéristiques et de celles de l'utilisateur (comme l'expertise ou le genre, Hannibal *et al.*, 2005). Nous avons ainsi montré que, dans le cas de la perception d'ambiances architecturales par des novices, certaines caractéristiques des représentations sont plus efficaces pour évoquer des dimensions de l'ambiance des espaces (Van de Vreken & Safin, 2010).

- Des représentations analogiques et univoques apparaissent suffisantes pour permettre la compréhension des aspects architecturaux et fonctionnels des espaces.
- La compréhension des aspects esthétiques est liée au caractère interactif de la représentation. Une maquette en carton manipulable permet une meilleure figuration de ces aspects : l'interactivité permet, d'une part, de sélectionner un point de vue sur l'objet (la notion esthétique étant subjective et personnelle, le point de vue doit également l'être) et, d'autre part, de faire varier la luminosité (en bougeant la maquette par rapport aux sources lumineuses). Cette luminosité semble être un facteur essentiel de l'évaluation des critères esthétiques des espaces architecturaux, par l'appréhension des volumes et des couleurs.
- Les notions de confort, quant à elles, semblent liées principalement au critère d'immersion. En effet, être immergé dans une représentation facilite la mise en relation du corps et de ses

mouvements avec la perception de l'espace, et donc l'évocation des sensations de confort qui y sont attachées. En outre, les rapports d'échelle sont modifiés avec une représentation immersive, ce qui permet d'appréhender les dimensions de l'espace en rapport avec celles de son propre corps.

- Enfin, d'un point de vue global, il semblerait que la perception des ambiances soit particulièrement liée à la présence d'une troisième dimension (qu'elle soit portée par un support 2D ou par un objet 3D) et à une certaine expressivité. Néanmoins, il apparaît pour ce dernier point qu'une modélisation sommaire (comprenant essentiellement des couleurs et des textures extrêmement simples) possède déjà un pouvoir évocateur certain.

Les représentations visuelles interviennent aussi en support avec d'autres tâches. Nous avons ainsi montré, dans le domaine de l'évaluation de la performance acoustique de salles de spectacles, qu'un support visuel (un modèle de la salle) permet de mieux comprendre les simulations sonores des caractéristiques acoustiques de cet espace (Billon, Safin, Defays, Decaestecker, & Warzée, 2010 ; Defays, Safin, Billon, Decaestecker, & Warzée, 2009, 2010).

Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement aux caractéristiques et aux usages de l'esquisse de pré-conception en architecture, à laquelle nous consacrons une section particulière.

3.3. Rôle de l'esquisse dans la conception individuelle

L'esquisse papier-crayon revêt encore une importance capitale dans tout le projet architectural : dans la recherche de concept, comme instrument d'expression non contraint et quasiment illimité ; dans les premières recherches formelles en tant qu'outil souple, immédiat et simple ; et dans les phases aval de la conception en tant qu'instrument d'annotation (que nous aborderons dans le cadre de la conception collaborative, voir section 4 de l'état de l'art).

On distingue trois types de croquis de pré-conception (Ferguson, 1992, cité par McGown *et al.*, 1998).

- Les esquisses de pensée (*thinking sketches*), supports privilégiés de la conversation avec la situation.
- Les esquisses en support à la communication verbale (*talking sketches*), produites pendant les échanges pour clarifier le dessin. Il s'agit principalement d'annotations.
- Les esquisses prescriptives (*prescriptive sketches*), qui servent à communiquer précisément avec des interlocuteurs pour donner des injonctions (classiquement pour donner des instructions à un dessinateur industriel dans le cas de conception en ingénierie). McGown *et al.* (1998) identifient aussi une différence entre des dessins de présentation (*presentation drawings*) et des dessins techniques (*drawing for manufacture*). Ces deux types de dessins possèdent néanmoins un caractère de complétude. Ces esquisses sont généralement utilisées plus tard dans le processus et ne sont pas l'objet de nos études.

A noter que certaines esquisses peuvent être de nature mixte : des esquisses de travail peuvent, par exemple, être utilisées à des fins de présentation.

Nous nous intéressons dans ce travail aux deux premières catégories. Cette section dresse un état des lieux du rôle des esquisses dans la conception individuelle (*thinking sketches*). Leur rôle en tant qu'outil de communication collective (*talking sketches*) sera abordé dans la section 4.6 de ce chapitre.

L'esquisse papier est un outil très polyvalent de communication avec soi ou avec d'autres. D'un point de vue global, les esquisses permettent d'externaliser directement des idées visuo-spatiales, en couchant sur papier des éléments spatiaux et leurs relations. Mais elles permettent aussi de représenter des idées abstraites. Une des forces de l'esquisse, en comparaison avec le langage, est sa capacité à porter des représentations analogues (Tversky, 2002). D'une manière générale, l'esquisse répond aux grandes fonctions des représentations externes identifiées au point 1.2.

3.3.1. Alléger la charge mentale

Le premier rôle de l'externalisation par le dessin est de réduire la charge cognitive du concepteur. Bilda & Gero (Bilda, Gero, & Purcell, 2006, Bilda & Gero, 2008) ont montré que la conception était possible uniquement par l'imagerie mentale, en mettant des concepteurs expérimentés en situation de conception les yeux bandés, sans recours possible au dessin²⁴. Ils observent que la production d'idées et la qualité du produit ne sont pas fondamentalement modifiées par la présence ou l'absence d'esquisses. Néanmoins, ils remarquent dans ces expériences que le dessin d'esquisse permet de soulager la mémoire de travail (Bilda & Gero, 2007) : dans les situations où le seul recours est l'imagerie mentale, l'activité cognitive tend à diminuer et la génération d'idées à se réduire à mesure que l'activité prend place dans le temps. Ils concluent que les limitations de la mémoire de travail rendent utile voire nécessaire l'activité de dessin : l'externalisation des relations visuo-spatiales entre objets permet de réduire l'effort mental nécessaire au raisonnement visuel dans la conception. Ils soulignent cependant le rôle essentiel de l'expérience dans cette capacité à raisonner sans esquisse²⁵ : les sujets observés sont des architectes avec des années de pratique. Ce processus d'externalisation est vraisemblablement plus important, voire indispensable, pour des architectes moins expérimentés.

L'esquisse permet donc de maintenir l'information principale à l'extérieur de la pensée. Cette externalisation permet un traitement visuel de l'information, qui peut se révéler moins coûteux que des traitements d'imagerie mentale. En effet, les images mentales ont tendance à se détériorer rapidement (Kosslyn, 1980, cité par Bilda & Gero, 2007) et doivent donc être re-générées, ceci à un certain coût cognitif.

De plus, outre soulager la mémoire à court terme, l'esquisse permet de faciliter certaines opérations cognitives de conception. D'une part, le dessin permet de fixer temporairement un certain nombre de décisions, réduisant ainsi l'incertitude liée au problème. Ces éléments fixés sont maintenus de manière plus ou moins stable et constituent donc aussi une mémoire du processus. D'autre part, le dessin joue aussi un rôle dans la décomposition du problème. Couché sur papier des idées relatives au bâtiment facilite le découpage du problème (spatialement mais pas seulement) et la réduction de sa complexité en ignorant certaines problématiques (McCall, Vlahos, & Zabel, 2001). En outre, c'est le concepteur qui choisit le point de vue qu'il souhaite adopter sur l'objet. Créer une représentation incomplète lui permet de traiter des sous-parties du problème. Par exemple, certains schémas décrivent un bâtiment sous un format topologique (graphe à bulles), sans se préoccuper du dimensionnement ou de la géométrie (Purcell & Gero, 1998).

L'esquisse à main levée est particulièrement efficace pour ces différents points : elle est rapide, directe et donc économique du point de vue cognitif, et elle autorise un *feedback* immédiat, permettant au concepteur d'entrer en conversation avec son dessin (Goldschmidt, 2003).

²⁴ A ce titre, Frank Lloyd Wright est aussi réputé pour son habitude d'ébaucher ses bâtiments sans l'aide de dessins dans un premier temps.

²⁵ Il faut aussi noter qu'à mesure que la complexité du projet augmente, il est probable qu'il ne soit plus possible de raisonner sans externalisation.

3.3.2. Structurer le comportement et étendre la cognition : conversation du concepteur avec son esquisse

La conception consiste en une conversation réflexive avec la situation, notamment au travers des représentations externes (Schön, 1983) : le concepteur produit des dessins, qu'il réinterprète pour développer de nouvelles idées ou de nouvelles contraintes. A ce titre, l'esquisse s'avère particulièrement efficace pour soutenir l'émergence de découvertes inattendues (Suwa *et al.*, 2000) Celles-ci sont des classes d'actions perceptives, qui consistent à inférer de nouvelles caractéristiques visuo-spatiales à des dessins effectués préalablement. C'est-à-dire que le concepteur, en revoyant ses propres dessins (parfois sous un autre angle), peut y découvrir un certain nombre de propriétés, comme une attention sur des formes, des tailles, des textures, ou encore des relations entre éléments qui vont permettre de faire évoluer le problème. L'esquisse agit ainsi comme un fournisseur d'*indices visuo-spatiaux* (Suwa *et al.*, 1998). Les découvertes inattendues entretiennent un lien important avec l'émergence des contraintes en conception (Suwa *et al.*, 2000). Les propriétés visuo-spatiales des esquisses, lorsqu'elles mènent à des découvertes inattendues, créent de nouvelles contraintes ou modifient les précédentes. Mais l'inverse est vrai aussi : le jeu des contraintes et des buts poursuivis par le concepteur permet de changer de point de vue et de guider l'apparition de découvertes inattendues. On retrouve donc dans la conversation avec l'esquisse, une double approche, descendante (*top-down*) et ascendante (*bottom-up*).

Ces découvertes d'indices sont aussi de riches supports à la créativité : grâce au caractère ambigu du dessin, de nouvelles idées peuvent émerger de la visite d'esquisses préalables. Principalement, l'esquisse permet de guider en partie le raisonnement analogique (notamment les analogies visuelles, Goldschmidt, 2003) et l'émergence du concept, car les éléments présents dans ces représentations vont activer des unités conceptuelles stockées dans un réseau de connaissances (Heylighen & Martin, 2002).

Mais ce dialogue va plus loin que la simple évocation d'indices visuels. En effet, l'esquisse fournit aussi un dispositif physique à partir duquel peuvent émerger des réflexions de haut niveau, sur des aspects fonctionnels ou conceptuels du bâtiment (Suwa *et al.*, 1998). L'esquisse sert donc la création d'une représentation, d'une image mentale du bâtiment. De nombreux débats existent en psychologie cognitive sur la notion d'imagerie mentale, en d'autres termes, la capacité à générer et à traiter des représentations visuelles de manière totalement interne. De nombreuses études ont montré, notamment sur les images réversibles (comme la célèbre figure suggérant à la fois la forme d'un vase et celle de deux visages), les limites de l'imagerie mentale (pour une revue complète, voir Purcell & Gero, 1998).

Goldschmidt (1991, 2003) propose le cadre de l'imagerie interactive (*interactive imagery*) pour expliquer la fonction que portent les esquisses personnelles (*self-generated sketches*) dans la génération d'images mentales. Selon elle, les représentations internes et externes s'entretiennent dans un rapport cyclique : les premières guident la production des secondes et les secondes en retour guident la génération des premières. Le concepteur n'externalise donc pas à proprement parler une pensée pré-établie sur un dessin, mais c'est au travers de ces dessins et de leur réinterprétation qu'émergent les nouvelles idées, solutions ou connaissances et que se construit l'image mentale de l'objet architectural. Ainsi, les concepteurs, en produisant des esquisses, créent les conditions, les *stimuli* qui vont être (ré)interprétés pour construire l'image de l'objet architectural (Goldschmidt, 1991). L'esquisse n'est pas, de ce point de vue, l'extériorisation d'une image mentale, mais plutôt une « interface perceptuelle » permettant la recherche de cette image.

Goldschmidt décrit ces phénomènes d'émergence comme une dialectique entre deux types de mouvements de conception : l'inférence de caractéristiques figurales sur la base du dessin (*seeing as*) et l'évocation de caractéristiques non figurales, liées aux plans et aux intentions (*seeign that*).

Ces deux types de processus s'enchaînent de manière cyclique pour construire l'image mentale de l'objet architectural. Les réinterprétations (*seeing-as*) peuvent porter sur des aspects spatiaux, mais aussi conceptuels : les attributs visuels de l'esquisse permettent l'émergence des réflexions sur les composantes et la forme, mais aussi et surtout sur des aspects abstraits ou fonctionnels (non visuels) de l'objet architectural (Suwa & Tversky, 1997). Ce phénomène de réinterprétation est probablement la fonction la plus importante des esquisses en architecture et intervient pour la génération de solutions créatives (Suwa *et al.*, 1998).

Ces phénomènes de réinterprétation existent aussi dans d'autres disciplines, comme la physique, la biologie ou l'économie. De manière spontanée, les individus dessinent des diagrammes pour les aider à résoudre les problèmes en cours (pour une revue complète, voir Purcell & Gero, 1998).

C'est dans cette optique que les esquisses personnelles s'avèrent particulièrement utiles, car elles autorisent un choix individuel des éléments soumis à la réinterprétation. Elles sont donc moins aléatoires de ce point de vue que d'autres *stimuli* visuels existant par ailleurs : le concepteur peut décider de volontairement externaliser un modèle flou, incomplet ou incohérent pour susciter de nouvelles découvertes (Goldschmidt, 2003). Les esquisses jouent véritablement un rôle médiateur entre le concepteur et sa solution. Elles sont donc des artefacts cognitifs au sens de Norman (1991), permettant d'étendre les capacités cognitives de l'individu.

3.3.3. Matérialiser l'information

Un des intérêts de l'esquisse est aussi la possibilité de matérialiser l'information. Ainsi, les concepts, les plans, les idées, via l'externalisation de la pensée du concepteur, deviennent des objets du monde. Cette matérialisation comporte trois avantages : les dessins peuvent devenir des objets échangés, ils sont soumis à des contraintes géométriques et topologiques, et peuvent être sujets à des manipulations physiques.

Les esquisses-objets peuvent avoir une vie relativement indépendante de leur auteur. Ainsi, elles peuvent servir de base à la communication à autrui (par exemple pour la transmission de concepts et d'intentions au client ou au partenaire). La facilité d'utilisation de l'esquisse, son immédiateté, son ouverture et sa polyvalence permettent de créer très rapidement des objets pour communiquer des idées à plusieurs niveaux d'abstraction (d'une esquisse précise à un schéma conceptuel). Elles permettent de mettre en avant des propriétés géométriques ou topologiques ou encore des relations analogues, difficilement communicables par le biais du langage oral. Pour Bucciarelli (2002), le dessin d'esquisse fournit un langage propre, complémentaire aux vocabulaires des disciplines. Ce rôle de soutien à la communication sera abordé plus en profondeur dans la section 4.6 de l'état de l'art.

En outre, l'esquisse permet aussi de fournir une aide mnémotique sur une base plus globale que le simple soulagement de la mémoire de travail. En effet, les esquisses de projets sont souvent conservées et restent à la disponibilité de leur auteur pendant la durée de la conception (même si elles sont souvent éliminées à la fin du projet). La collection de dessins inter-reliés permet de garder une mémoire du processus.

Ensuite, cette matérialisation permet de confronter les pensées du concepteur à la réalité. Pour concevoir, les concepteurs doivent en effet instancier des connaissances de haut niveau et des souvenirs de précédentes conceptions et les éprouver physiquement et géométriquement. L'esquisse, en tant qu'objet extérieur à la pensée et régie par des lois physiques, permet de faciliter cette confrontation au réel, difficile (quoique possible) à faire mentalement (Goldschmidt, 1991). Ainsi, l'esquisse est notamment support de vérification de la cohérence géométrique et topologique de l'objet architectural : certaines figures ou configurations ne peuvent exister de

manière cohérente dans le monde physique, hors de la pensée de celui qui les produit²⁶. A noter que le croquis papier-crayon n'est pas nécessairement le meilleur moyen pour cette vérification : les modèles numériques de CAO, avec les contraintes de complétude et de précision qu'ils nécessitent, constituent des supports de vérification plus efficaces. L'esquisse, par contre, possède un caractère d'efficacité de ce point de vue : elle permet une quasi immédiateté de l'externalisation et donc de la vérification. Elle permet aussi de volontairement garder une imprécision, de l'ambiguïté voire de l'incohérence pour pouvoir avancer dans la conception, ce qui n'est pas le cas des modèles numériques.

Enfin, les dessins peuvent être manipulés. Cette manipulation permet de favoriser les réflexions sur base de l'esquisse. Il est ainsi possible, par exemple, de retourner un dessin pour avoir un autre point de vue sur l'objet et ainsi faciliter les découvertes inattendues et les réinterprétations. Il est également possible de positionner plusieurs dessins les uns par rapport aux autres afin de faciliter leur comparaison. A ce titre, les calques semi-transparents, supports privilégiés pour l'architecture, sont particulièrement intéressants : ils permettent de manipuler l'information, de l'agencer différemment, d'expérimenter pour réaliser de nouvelles découvertes (Goldschmidt, 2003). Ces notions de transparence et de superposition prennent une importance particulière dans le processus de conception (on parle ainsi de « *layered artifacts* », Détienne, Baker, & Visser, 2009) : elles permettent notamment de réutiliser des dessins précédents pour concevoir une nouvelle version par un processus de mise au net de ces dessins.

3.3.4. Pourquoi l'esquisse est-elle un moyen privilégié?

De nombreuses études ont été menées afin de comparer l'efficacité des esquisses papier à celle des outils de CAO dans les phases préliminaires de la conception. Les croquis, externalisations de la pensée du concepteur, permettent de représenter des états intermédiaires de l'objet architectural de manière simple, souple et rapide. Outre cette immédiateté dans la fonction de présentation et de conservation de l'information, deux classes de différences essentielles expliquent l'utilisation préférentielle du dessin à main levée en comparaison avec les représentations numériques dans les étapes créatives de la conception.

Tout d'abord, le croquis est abstrait et ambigu, donc adapté à des étapes peu développées d'un projet. Les dessins numériques, aux contours rigoureux, sont considérés comme plus finis et moins créatifs que les esquisses traditionnelles, floues et réalisées à main levée (Brown, 2003). D'une manière générale, les architectes manifestent une préférence pour des représentations ayant l'apparence de dessins à main levée et monochromes plutôt que des images photo-réalistes (Hannibal *et al.*, 2005). Le caractère flou des esquisses favorise la liberté d'interprétation et les activités de perception visuo-spatiales (Bilda & Demirkan, 2003). Alors que les représentations numériques possèdent un caractère univoque, l'esquisse est suffisamment floue pour favoriser l'émergence de découvertes inattendues (Goldschmidt, 1991).

Outre ces aspects purement perceptifs, les concepteurs ont besoin de liberté, d'ambiguïté et d'imprécision pour créer rapidement les objets qu'ils ont en tête. L'esquisse favorise ainsi la production d'un plus grand nombre de solutions alternatives pour une durée donnée (Bilda & Demirkan, 2003 ; Goel, 1995). L'ambiguïté permet d'ignorer certaines composantes du problème comme la forme et le dimensionnement pour en réduire la complexité (McCall *et al.*, 2001). L'architecte conserve donc volontairement une imprécision à l'esquisse pour éviter un

²⁶ On citera, à titre d'exemple, des figures impossibles (telles que celles proposées par l'artiste MC Escher) qui ne peuvent exister dans le monde réel. Un exemple plus simple est celui de la configuration d'un ensemble de surfaces constituant un programme mais dépassant largement la surface totale disponible : cette configuration faussée est possible mentalement, mais ne l'est plus dès lors qu'on la confronte à une géométrie précise.

enfermement trop rapide dans une solution unique et pour se préserver une marge de manœuvre au cours de son activité. Les plans effectués à l'aide d'outils de DAO commerciaux obéissent à des règles strictes dans leur composition et sont généralement effectués lorsque l'objet architectural est assez précis. Ces règles strictes ne permettent pas l'expression « personnelle » qu'autorisent les esquisses. Il n'est donc pas possible, par exemple, de « gribouiller », de dessiner des diagrammes, de faire des mouvements spontanés de stylo, etc., activités nécessaires au raisonnement visuel dans la conception (Bilda & Demirkan, 2003). Les modèles de CAO obéissent aussi aux mêmes logiques : devant alimenter des évaluateurs de performance, ils doivent impérativement être complets et précis.

Enfin, la conception avec croquis papier est un processus non destructif au cours duquel les dessins sont progressivement transformés jusqu'à ce qu'une solution finale soit atteinte, alors que les logiciels de CAO/DAO impliquent une suppression des éléments préalables en cours de conception (McCall *et al.*, 2001). Ainsi, les actions de modification sont plus souvent observées dans les systèmes de CAO/DAO que sur papier, alors qu'à l'inverse, des actions de copie sont plus fréquentes sur papier-crayon (Bilda & Demirkan, 2003). Le concepteur produit donc une large collection de dessins hétérogènes mais inter-reliés, alors que les systèmes CAO/DAO construisent un modèle unique, isolé du processus global. Ces dessins hétérogènes permettent d'adopter de multiples points de vue sur l'objet et de comparer de nombreuses solutions à des niveaux d'abstraction différents (McCall *et al.*, 2001). Leur collection permet de garder un historique de la conception qui joue un rôle important dans la détection des erreurs. Ces actions de copie et la production de nombreux dessins facilitent l'émergence des découvertes inattendues et des réinterprétations.

3.4. Propriétés graphiques des esquisses

Selon nos dimensions proposées au point 3.2, l'esquisse de conception en architecture est généralement visuelle, ambiguë (elle ne représente pas l'objet de manière univoque), interactive (en tant que support évolutif de la conception), émulsive, en 2D (ou 3D sur support 2D dans le cas des dessins en perspective) et synthétique. Cette dernière dimension est discutable : certains dessins à main levée peuvent avoir un pouvoir expressif très fort et figurer de manière très exhaustive l'objet architectural. Mais nous distinguons ici l'esquisse de conception des autres formes de dessin. Cette dernière poursuivant un principe d'économie, elle est, en général, relativement synthétique (Leclercq, 2005). Elle pourra aussi varier sur la dimension « conceptuelle vs. analogique ». En effet, l'expression graphique permet toutes les compositions, des diagrammes ou concepts abstraits aux plans et concepts exprimés spatialement. Les esquisses sont souvent composées de nombreux dessins différents inter-reliés : des variantes d'un même dessin, des points de vue différents sur l'objet, des informations complémentaires comme des détails (*satellite drawings* selon McCall *et al.*, 2001, dessins seconds selon Leclercq, 2005).

Au point de vue de sa composition graphique, l'esquisse de conception possède des caractéristiques différentes des représentations numériques produites par des logiciels CAO (Leclercq, 2005). McGown, Green & Rogers (McGown *et al.*, 1998, Rodgers, Green, & McGown, 2000), dans le domaine du design industriel, différencient le degré de complexité des esquisses en fonction de plusieurs critères :

- l'utilisation de couleurs ou dessin en noir et blanc ;
- l'utilisation d'ombrages plus ou moins fins et stylisés pour représenter la perspective ;
- le nombre et la variété des traits ;
- l'utilisation d'annotations plus ou moins précises et structurées, et de dimensions explicites.

Plus la conception avance, plus les esquisses deviennent complexes.

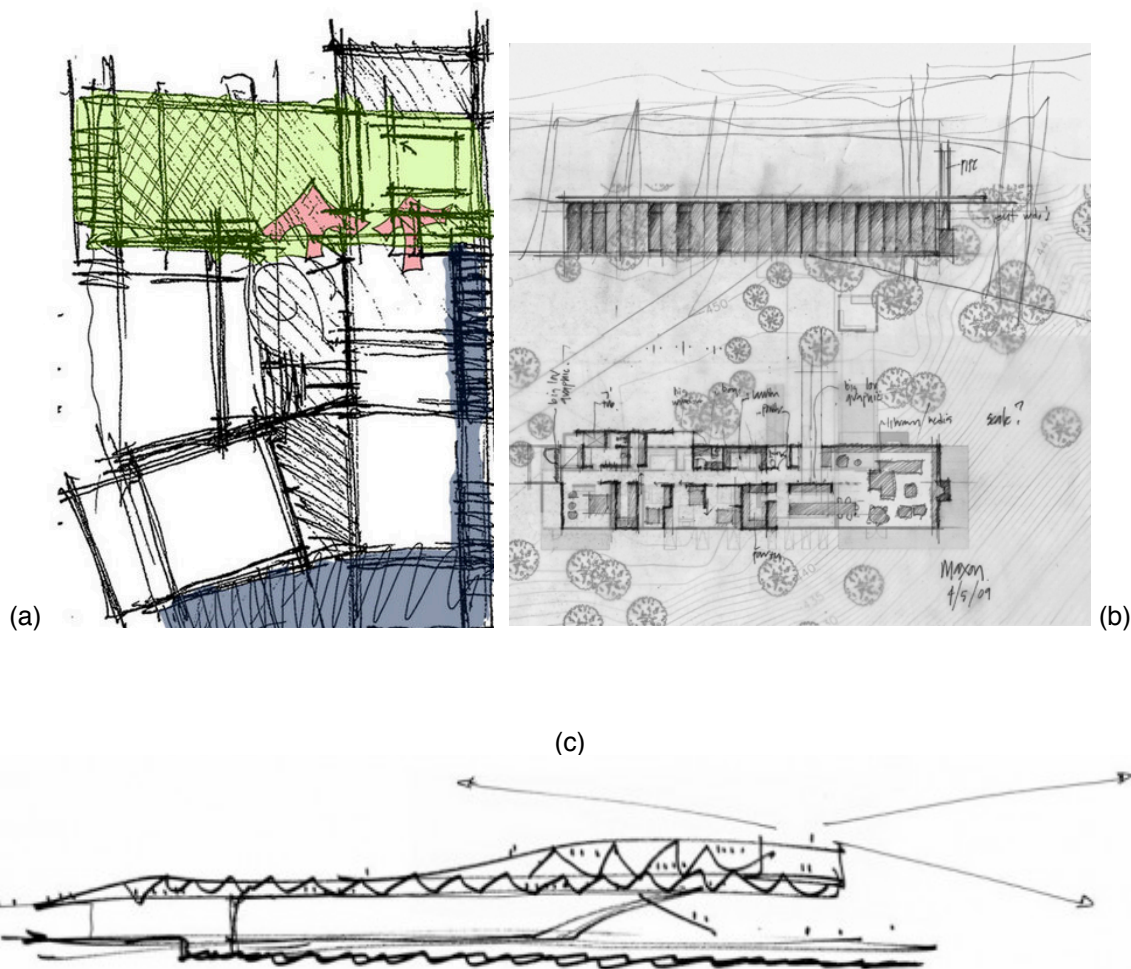


Figure 16

Esquisses de conception de différents niveaux de détails. (a) Stacked House, Architecture Paradigm ; (b) Maxon House, Tom Kundig of Olson Kundig Architects et (c) terminal du ferry a Stockholm, Møller Architects²⁷.

Leclercq & Elsen (2007) distinguent en outre deux types de croquis de conception : l'esquisse conceptuelle et l'esquisse synthétique (figure 17). La première est typique de l'esquisse étudiée en conception architecturale : elle est guidée par une approche formelle et vise à soutenir le processus plus que le contenu. Elle répond au principe d'économie dans sa construction. Les traits de l'esquisse sont peu variés (types de pointillés, couleurs, épaisseur, etc.) et sont d'une grande imprécision. Le dessin est incomplet et la forme émerge via une accumulation de traits parfois redondants. Ces esquisses sont denses d'un point de vue syntaxique et/ou sémantique (Goel, 1995). Plusieurs solutions au problème architectural coexistent souvent sur un même croquis. Ce type de dessin présente un caractère extrêmement personnel qui limite sa compréhension par une autre personne.

L'esquisse synthétique, que l'on retrouve dans l'activité de relevé de terrain ou lors de la mise au net en phase créative de conception, est un intermédiaire entre l'esquisse purement personnelle et conceptuelle, et le plan net. Elle possède un rôle de communicant d'intentions, est guidée par une approche topologique (le positionnement des éléments est validé mais pas leurs dimensions) et sa construction répond à un principe d'efficacité : les traits sont réduits au strict essentiel. Sans être précis ou complet, le dessin est cependant moins ambigu que l'esquisse conceptuelle. Les

²⁷ Sources : <http://plusmood.com/> & <http://www.dwell.com>

annotations sont nombreuses et servent à expliciter certaines intentions. Le croquis synthétique a donc une fonction de communication, avec soi ou avec d'autres, qui se base sur un mode d'exécution rapide.

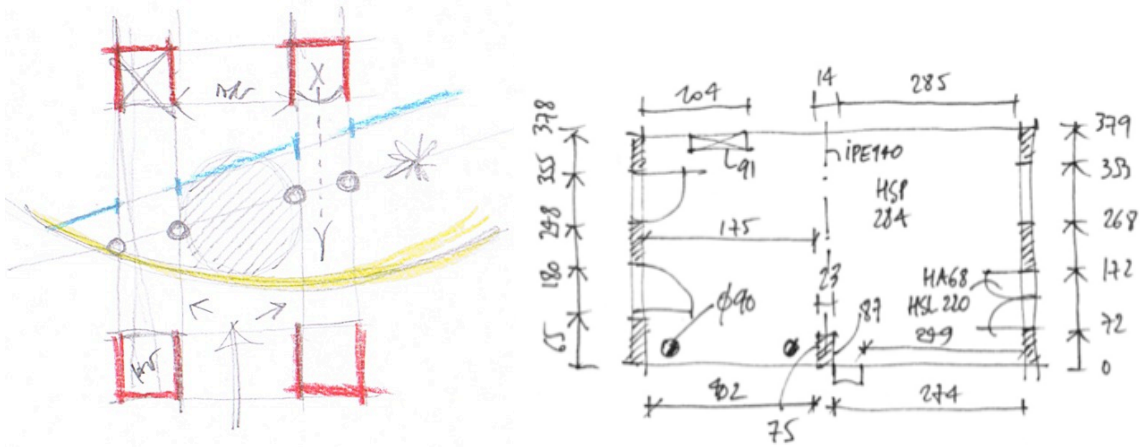


Figure 17
Esquisse conceptuelle (gauche) et esquisse synthétique (droite) (tiré de Leclercq & Elsen, 2007).

Au contraire, les plans nets construits sur outils de CAO/DAO sont tout à fait complets et précis. Ils contiennent une représentation unique de l'objet architectural. Les traits utilisés sont très variés et entièrement codifiés. Le dessin est parfaitement communicable et construit dans ce but. Le plan net répond dans sa construction à un principe de complétude : toute imprécision et ambiguïté doit disparaître au profit d'une validation géométrique complète.

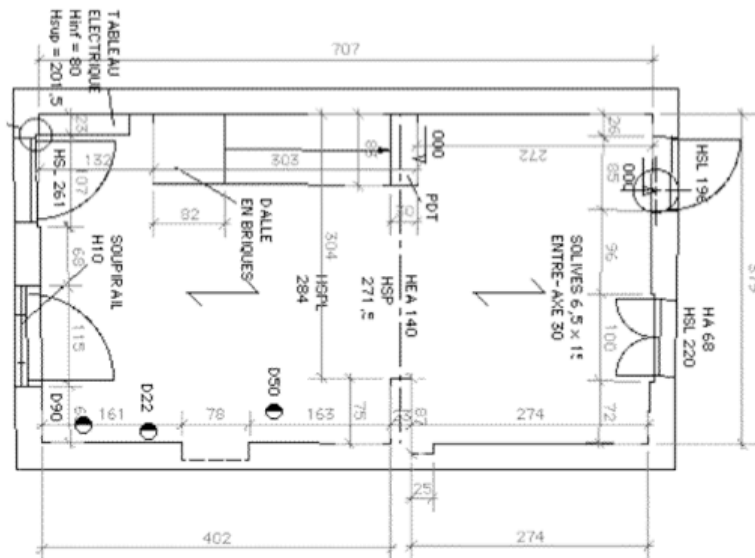


Figure 18
Plan sur outil DAO (tiré de Leclercq & Elsen, 2007).

L'esquisse permet une variation du niveau d'abstraction de la représentation de l'objet architectural. Il y a deux dimensions à cette abstraction en conception (Rasmussen, 1986). La

première est associée au niveau de détails dans lequel le concepteur évolue (généralité vs. détails) et la seconde est relative au degré de précision dans le point de vue considéré dans la réflexion (de la fonction abstraite à la forme). Cette variation de points de vue est essentielle en conception. Néanmoins, on observe plutôt une prégnance des bas niveaux d'abstraction dans l'esquisse et ce, pour deux raisons principales (Darses, 2004) : d'une part, pour faciliter l'évocation de projets et de connaissances antérieures aidée par les représentations concrètes et, d'autre part, pour permettre de gérer et de propager les contraintes particulières qui, même au démarrage du processus, sont souvent précises et concrètes (on retrouvera ainsi dans certains cahiers des charges la spécification de matériaux).

3.5. Transformation des esquisses et externalisation

Différents auteurs ont étudié la conception préliminaire, notamment en architecture, à travers la succession des représentations graphiques générées. Les esquisses à main levée, largement majoritaires à ce stade du projet, y sont étudiées comme les instantanés caractéristiques de l'évolution du processus de conception. C'est l'étude de ces transformations qui nous renseigne sur les intentions du concepteur, les stratégies adoptées et sur les opérations cognitives mobilisées.

Lebahar (1983) a ainsi décrit les premières étapes de la conception architecturale comme un dialogue et une articulation constante entre des représentations internes (modèle mental) et externes (esquisses et notes), tendant vers un mouvement global et progressif de réduction de l'incertitude : à mesure que les dessins croissent en précision, le modèle mental gagne en certitude. Le concepteur développe tout d'abord le diagnostic architectural : il réunit et formule les différentes contraintes susceptibles d'être exprimées spatialement. Pour structurer le problème, il crée une « base graphique de simulation » qui servira de point de départ de la recherche de l'objet. Cette recherche s'opère par simulation graphique, c'est-à-dire par l'expression spatialisée d'un certain nombre d'hypothèses visant à réduire l'incertitude. Leur évaluation se fait aussi au travers des représentations externes. Les nouvelles solutions envisagées et testées viennent progressivement s'intégrer aux dessins, jusqu'à une précision géométrique complète. Ainsi, la succession des dessins est décrite de manière globale par une tendance à augmenter la précision et à réduire l'incertitude.

Dans une optique plus locale, les études scientifiques de l'esquisse ont également permis la description des opérations qui émergent de la production d'esquisses successives. En effet, les dessins sont rarement produits seuls et ils entretiennent des relations plus ou moins importantes entre eux (McCall *et al.*, 2001). Un dessin peut être tracé à partir d'un autre, voire sur un autre ; il peut être un développement d'un dessin précédent ; une représentation plus abstraite du contenu d'un autre dessin ; une alternative à un dessin précédent sur un autre dessin ; une partie d'un autre dessin (dessin de détail) ; ou un dessin réintégré dans un autre plus large (plan d'ensemble par exemple). Ces relations sont combinables : ainsi, un dessin pourra par exemple constituer une alternative à un détail d'une représentation précédente. Les dessins inter-reliés sont présents sur des calques séparés ou sur les mêmes feuilles, et constituent des « dessins seconds » (Leclercq, 2005). En architecture, le dessin tire souvent profit de la transparence des papiers-calques qui permet de baser précisément un nouveau dessin sur un précédent.

Goel (1995) analyse le processus de conception en définissant trois types de transformations entre deux représentations se succédant : les transformations latérales (d'une solution vers une solution légèrement différente), verticales (d'une représentation vers une représentation plus détaillée de la même solution) et les duplications (d'une représentation à une représentation équivalente). Goel montre aussi que les esquisses à main levée jouent un rôle important dans l'activité exploratoire, grâce à leur ambiguïté et leurs densités syntaxiques et sémantiques. Il suggère que les propriétés

du dessin à main levée facilitent les transformations latérales et préviennent des fixations précoces. Suwa & Tversky (1997) constatent que, sur base de protocoles de courte durée, les architectes professionnels réalisent autant de transformations verticales que latérales. Dans une perspective plus globale (en analysant un protocole de quinze semaines), Rodgers *et al.* (2000) observent cependant des épisodes de pensée latérale et des épisodes de pensée verticale, même s'il n'y a pas de *patterns* précis. Ils constatent aussi qu'en moyenne, les étudiants usent en proportion égale des deux types de transformations, mais que certains sujets manifestent des préférences pour l'un ou pour l'autre type (McGown *et al.*, 1998). Ces résultats contradictoires sont probablement en partie dus au niveau de granularité différent de ces études, mais ils montrent aussi le caractère opportuniste de la conception.

Dans leur analyse de protocoles d'architecture intérieure, Bilda & Demirkan (2003) ont observé l'importance de la duplication de dessins. Les séquences où le concepteur redessine une esquisse sont suivies très régulièrement par la redéfinition d'un élément préalable. Ainsi, la copie de dessin, selon ces auteurs, susciterait la pensée visuelle et induirait des réinterprétations. Le processus de réinterprétation serait donc dynamique plutôt que statique.

Rodgers, Green et McGown (2000), en complément de la caractérisation des transformations proposée par Goel, utilisent la notion de complexité comme mesure de l'évolution du projet. Les croquis sont qualifiés sur une échelle de complexité graphique allant de 1 (dessin au trait monochrome sans annotation ni ombrage) à 5 (nombreux traits, usage intensif des ombrages, annotations expliquant les choix de conception). Selon le cas, ils y ajoutent un critère de taille pour calculer la quantité d'information (McGown *et al.*, 1998). Ils montrent, sur un protocole de quinze semaines, que les étudiants observés manifestent des pics de production d'informations dans le premiers tiers du processus (sans doute liés à l'émergence du concept) et d'autres en fin de processus, juste avant le passage en phase de production. Ils soulignent ainsi que dans de bonnes conditions, les dessins ont tendance à évoluer vers davantage de complexité. Par l'utilisation commune des types de transformations de Goel et du degré de complexité des esquisses, les auteurs parviennent à décrire certaines propriétés de la conception : un « bon » *design* serait caractérisé par des épisodes latéraux et verticaux en début de processus (recherche du concept), une prédominance d'épisodes verticaux dans les étapes finales de la préconception (passage en phase de production) et une complexité croissante des esquisses. Une complexité stagnante des esquisses et une majorité d'épisodes de pensée latérale seraient un indice d'une difficulté à choisir un concept ou d'un « biais de fixation ».

Visser (2006) précise les transformations de Goel et distingue cinq actions de transformation.

- Dupliquer : répliquer ou reformuler un dessin.
- Ajouter : ajouter de nouvelles informations au dessin ou modifier de manière limitée la représentation de base.
- Détailler : retravailler différentes parties d'une représentation en représentations plus détaillées.
- Concrétiser : reprendre une représentation de manière plus concrète.
- Modifier : remplacer par une représentation sans la détailler ni la concrétiser.
- Substituer : remplacer par une représentation alternative, ni plus détaillée ni concrétisée.

Néanmoins, ces études ne se sont pas centrées sur la dynamique de la transformation, c'est-à-dire sur les opérations cognitives nécessaires pour passer d'une représentation à une autre. Comme évoqué précédemment, c'est moins la présence de représentations externes que leur construction qui fournit un moyen de « réflexion en action » (selon la terminologie de Schön, 1983). C'est ainsi qu'à notre sens, l'esquisse ne doit pas être appréhendée uniquement en tant que représentation « figée » mais bien dans une perspective dynamique en tant que produit d'une *activité* de dessin.

Synthèse

Cette section fait un état des lieux des différents outils et types de représentations en architecture, pour aboutir à une réflexion sur le rôle cognitif particulier porté par l'esquisse papier-crayon. Dans un premier temps, nous avons brièvement situé les différents outils de représentation en architecture. Nous avons ensuite proposé une typologie des représentations en sept dimensions. Fort de cette mise en contexte, nous avons explicitement décrit les fonctions cognitives portées par les esquisses, leurs caractéristiques graphiques et leurs modes de transformation.

En synthèse, et en comparaison aux modes de représentations numériques en architecture, l'esquisse papier-crayon permet, grâce à la liberté offerte à son concepteur, toutes sortes de compositions. L'esquisse est, par essence, un médium flexible de la pensée architecturale. Son caractère flou et ambigu encourage des réinterprétations, essentielles pour la pensée créative. Son caractère spontané et immédiat permet des vérifications rapides, des stratégies d'essais et erreurs et la collection de nombreuses versions des dessins. Son caractère ouvert permet l'incohérence, l'incomplétude et la coexistence de différents niveaux d'abstraction, nécessaires à la complexité de la pensée architecturale créative.

Enfin, nous avons montré que l'esquisse de conception était guidée par un principe d'économie, perceptible dans les caractéristiques graphiques des dessins : ceux-ci sont réduits à l'information essentielle nécessaire au concepteur. Cependant, à mesure que la conception avance et que l'objet se précise, les esquisses tendent à devenir plus complexes, moins ambiguës et plus précises. Au terme de cet avancement, l'esquisse est prête à devenir une représentation DAO, explicite, complète et univoque

4. Dimension collective de la conception

La plupart des auteurs s'accordent à dire que la conception, dans son acception la plus large, est par essence collaborative. Cette activité ne peut plus être considérée comme mobilisant uniquement un acteur sur un poste de travail. Dans la plupart des cas, la création d'un nouveau produit fait appel à de nombreux acteurs aux profils différents : concepteurs, acteurs du management et du marketing, clients, etc. (Bucciarelli, 2002). Ainsi, si les approches de laboratoire ont permis d'étudier des activités de conception individuelle, il est extrêmement rare, dans la vie professionnelle, d'observer des situations de conception menées par un seul individu (Visser, 2001). L'intérêt d'une approche collaborative dans les activités humaines est évidemment de transcender les limites cognitives des collaborateurs pris individuellement. Le travail collaboratif permet l'extension des capacités de l'individu, la différenciation et la combinaison de spécialités, l'évaluation et la critique mutuelles, ainsi que la confrontation et la combinaison de perspectives (Schmidt, 1993).

La conception est composée d'activités individuelles et collectives qui se coordonnent pour arriver au produit final²⁸. Pahl *et al.* (1999), en se basant sur de nombreuses situations de terrain, insistent sur le caractère complémentaire des situations collaboratives et individuelles en conception : les premières seraient plus efficaces pour l'analyse du problème, la détermination du but, pour la génération d'idées et pour l'analyse de la solution (en ce compris les critiques et les évaluations) ; alors que les secondes seraient dirigées vers l'acquisition et la fourniture d'informations, le développement des solutions, les calculs et la clarification de certains problèmes détaillés.

Les nouvelles technologies de communication, notamment le web 2.0, ont également permis d'ouvrir les communautés de concepteurs de manière conséquente et d'étendre la notion de conception collaborative à la conception par le collectif (Maher, Paulini, & Murty, 2010). Les communautés Open-Source sont des exemples d'agrégation de nombreux individus travaillant ensemble sur un même logiciel. Ces communautés font appel à des outils, des modes de régulation et des modes de communication qui leur sont propres. Ces situations de conception très étendue ne seront pas développées dans ce travail.

L'évolution des entreprises actuelles fait de la collaboration un enjeu majeur dans les différents domaines de la conception, notamment car ces entreprises sont sujettes à des mutations dans leurs pratiques (Darses, 2004).

- L'augmentation de la complexité des produits, la spécialisation croissante des compétences et l'utilisation de plus en plus répandue des méthodes participatives de conception engendrent une multiplicité des acteurs, aux profils de plus en plus hétérogènes.
- Les besoins de plus en plus critiques en termes d'innovation et les contraintes temporelles fortes font que les interactions entre acteurs de la conception sont de plus en plus organisées simultanément et non séquentiellement, comme par le passé (Boujut, 2010).
- Les entreprises sont de plus en plus réparties géographiquement. La réunion des différents acteurs est parfois difficile et souvent coûteuse. Il apparaît donc nécessaire de pouvoir organiser la collaboration, au moins en partie, à distance.
- La compétitivité et la flexibilité croissante des entreprises font apparaître la nécessité de capitaliser les connaissances.

²⁸ En 1999, Pahl *et al.*, évaluaient la proportion de travail d'équipe à moins de 30% et le travail individuel à plus de 70% dans le domaine de la conception mécanique. Il est probable que depuis, cette proportion ait évolué vers un pourcentage de collaboration plus important, et qu'elle soit plus importante en architecture, dont la définition de l'objet mobilise nécessairement plusieurs disciplines.

En architecture en particulier, les nouvelles possibilités technologiques permettent de construire des ouvrages bien plus complexes qu'auparavant. Les questions sociales, de maintenance et d'usages, interviennent aussi de plus en plus au cœur de la réflexion dans les phases précoces de la conception architecturale. Cette augmentation des possibilités et de la complexité impose un défi majeur pour les architectes : l'intégration des différentes composantes techniques et fonctionnelles. Le travail en agence est donc devenu, par la force des choses, nécessairement collaboratif (Schmidt & Wagner, 2004).

Ainsi, à l'heure actuelle, il devient essentiel de comprendre la conception dans une optique plus large, impliquant des acteurs diversifiés, eux-mêmes travaillant dans des situations variées. Les évolutions actuelles liées à l'ouverture des frontières, à l'organisation en réseaux, aux contraintes dictées par des impératifs de rapidité et d'écologie, ainsi qu'à l'explosion des technologies de communication, invitent les entreprises, et par conséquent les acteurs de la conception, à organiser la collaboration de plus en plus à distance. Si cette collaboration à distance est relativement bien outillée par des supports à la coordination et à l'échange d'informations asynchrone, elle souffre d'un manque d'outils pour la conception synchrone. C'est ce soutien à l'activité synchrone à distance que nous proposons de supporter grâce à des dispositifs d'esquisse numérique.

Dans cette section, nous dressons un portrait des caractéristiques, des activités et des enjeux principaux de la collaboration en conception. Le domaine de la collaboration étant très vaste, nous centrons nos propos sur la collaboration dans des collectifs de tailles réduites et ce, pour deux raisons : d'une part, il s'agit des activités que nous cherchons à soutenir avec nos dispositifs d'esquisse numérique et, d'autre part, dans les agences d'architecture, le travail collaboratif intégré tend à prendre place dans des petits collectifs, le reste des interactions étant plutôt de la gestion organisationnelle de tâches réparties. Nous insistons spécifiquement sur le rôle de la distance et abordons la collaboration principalement dans ses dimensions interactionnelle et communicationnelle. Ce sont, en effet, les rôles que nos dispositifs numériques visent à supporter. Nous n'aborderons donc pas spécifiquement les notions organisationnelles, psychodynamiques, affectives, motivationnelles ou autres de la collaboration.

4.1. Acteurs de la collaboration en architecture

Ce qui caractérise sans doute le plus l'architecture est la diversité des acteurs. Tout d'abord, le maître d'ouvrage, ou client, est responsable de l'expression des besoins (Ango-Obiang, 2007). Il peut, selon les cas, être constitué d'un seul individu ou d'un groupe et être assisté par des professionnels de la maîtrise d'ouvrage. Ensuite, le maître d'œuvre, acteur incontournable, est responsable de la conception de l'objet et de la supervision de sa construction. Il peut aussi être un architecte seul ou une équipe de plusieurs professionnels se partageant les responsabilités. On constate souvent que les grands bureaux d'architecture créent des associations momentanées avec de plus petits bureaux locaux, pour la réalisation de certains projets, nécessitant une présence sur le terrain et des connaissances locales (réglementations spécifiques, supervision continue du chantier, etc.).

Viennent après les différents consultants techniques nécessaires à la définition du projet : ingénieurs structures, ingénieurs en techniques spéciales, auditeurs énergétiques, ingénieurs acousticiens, paysagistes, architectes d'intérieur, etc. Le nombre de ces acteurs dépendra principalement de la taille et de la spécificité du projet. Ces acteurs peuvent intervenir dans la conception, bien que la plupart du temps, ils ne soient impliqués que plus tard dans le processus, dans les phases de production ou d'optimisation. Le moment de l'implication de ces acteurs est sujet à un paradoxe : des réflexions plus précoces sur ces différents sujets permettraient sans doute d'éviter certaines erreurs de conception, mais l'implication précoce de ces acteurs ajoute

des contraintes dès le début du projet, et augmente donc sa complexité. En acoustique par exemple, les acteurs impliqués (architectes, acousticiens et maîtres d'ouvrage) négocient, de manière parfois longue et compliquée, les différents choix techniques selon leurs contraintes propres. Ainsi, l'acousticien visera la performance de la salle, l'architecte défendra la cohérence architecturale de l'ensemble et l'esthétique du projet, tandis que le maître d'ouvrage portera les contraintes budgétaires (Dawans *et al.*, 2009).

La quatrième catégorie d'acteurs est constituée par des autorités de régulation. Elles n'interviennent pas au sein même de la conception, mais doivent être sollicitées directement, pour des autorisations et permis, ou indirectement, via les réglementations qu'elles mettent en place et qui structurent en grande partie les possibilités d'action (par les règles d'urbanisme notamment).

Enfin, tous les acteurs du chantier, en aval de la conception, participent au développement et à la construction de l'objet architectural.

Tous les professionnels impliqués possèdent des connaissances, des compétences et des points de vue différents et complémentaires sur l'objet, qu'il est nécessaire d'intégrer pour parvenir à un résultat optimal.

4.2. Modes de collaboration en conception

Pour concevoir un objet matériel (bâtiment, objet technique, machine-outil, etc.) ou immatériel (logiciel, texte, etc.), il est nécessaire d'agir sur l'objet de manière collective (générer des idées, évaluer et transformer l'objet), et d'assurer une coordination, prise au sens large du terme, entre les acteurs. Cette coordination dépend du type d'interaction entre les personnes, de leur proximité et des outils mis à leur disposition pour communiquer. Ainsi, il convient, afin d'appréhender la conception collaborative, de sortir du champ strict des activités cognitives, pour adopter une démarche située (Darses, 2004) ou socio-cognitive (Détienne *et al.*, 2009).

Une première distinction entre les modes de conception collective classiquement opérée en ergonomie francophone permet de classer les modes opératoires en fonction de l'intégration des buts entre les différents acteurs (Darses & Falzon, 1996 ; Darses *et al.*, 1996).

- On parlera de conception distribuée dans le cas où les acteurs effectuent des tâches distinctes mais interdépendantes, chacun mobilisant ses propres ressources et sa propre temporalité pour mener à bien des objectifs spécifiques servant au projet commun. L'action est simultanée mais non conjointe. Ici, l'enjeu essentiel est la synchronisation temporo-opératoire (Falzon, 1994), c'est-à-dire la coordination des différentes actions des partenaires et leur articulation temporelle.
- Le second type de conception collective est appelé co-conception. Ici, les acteurs répondent ensemble au problème de façon intégrée : ils partagent des buts communs, génèrent des solutions et les évaluent ensemble. L'enjeu de ce type de conception collaborative est la synchronisation cognitive, c'est-à-dire la création, par le biais d'actions de communication, d'un contexte commun partagé qui permet à l'ensemble du collectif de coordonner de manière plus efficace son action. Les contraintes de coordination sont très fortes dans ce mode de fonctionnement.

Ces deux types d'activités collaboratives sont parfois nommés respectivement coordination et collaboration (Kvan, 2000) ou coopération et collaboration (Roschelle & Teasley, 1994). Un troisième type peut être distingué : la co-action, c'est-à-dire l'action simultanée de plusieurs personnes partageant les mêmes ressources mais ayant chacune des buts propres. Ce type d'activité est cependant relativement peu présent dans le domaine de la conception (Darses, 2004).

Dans la plupart des projets de conception, l'essentiel du travail se fait sur un mode de conception distribuée, dans lequel chaque expert travaille sur des problématiques différentes. Cette conception distribuée est ponctuée de moments de co-conception, durant lesquels les différentes décisions sont évaluées, négociées et intégrées (Kvan, 2000). On voit ainsi s'articuler des phases de travail très intégré et des phases de travail plus individuel et coordonné. L'importance de ces deux modes de travail varie en fonction de l'avancement du projet (la co-conception étant plus utile dans les phases précoces), de la taille du collectif (un collectif très large implique de se centrer avant tout sur la coordination des actions, donc sur la conception distribuée), de la structure organisationnelle (découpage des tâches, habitudes de travail) et de la répartition géographique des acteurs (des équipes travaillant à distance doivent avant tout mettre l'accent sur la distribution formelle des tâches, ceci n'excluant pas des épisodes de co-conception). Nous détaillons dans les sections suivantes les processus cognitifs mis en œuvre dans ces deux types de collaboration.

La conception collaborative nécessite la mobilisation de plusieurs classes d'activités cognitives.

- Des activités cognitives centrées sur la tâche de conception (*content-oriented*, Stempfle & Badke-Schaub, 2002), à savoir la structuration, la génération et l'évaluation (propositions de solution, critiques, suggestions d'objectifs, etc.) Ces activités ne sont pas fondamentalement différentes en conception individuelle ou collective, mais passent par un processus d'argumentation dès lors qu'elles mobilisent plusieurs personnes.
- Des activités spécifiquement centrées sur le processus (*process-oriented*, Stempfle & Badke-Schaub, 2002), notamment la gestion des points de vue, la synchronisation, la résolution de conflits, la construction d'une connaissance partagée, etc. (Visser, 2001).
- Des activités de gestion de l'interaction, c'est-à-dire la gestion de l'organisation de l'espace de travail, des documents et de la communication (Détienne, Boujut, & Hohmann, 2004)

Stempfle & Badke-Schaub (2002) ont montré dans une étude empirique sur des situations de conception collaborative qu'environ deux tiers des interactions sont dirigés vers le contenu de la conception et un tiers vers le processus. Toutes ces activités prennent notamment place à travers des activités argumentatives (Darses, 2004). Il est donc possible d'étudier les processus cognitifs via les interactions verbales entre les concepteurs, sans recours à des artifices particuliers, comme c'est le cas pour la conception individuelle. Dans les sections suivantes, nous décrivons les mécanismes qui sous-tendent ces trois grandes classes d'activités.

4.3. Activités centrées vers la tâche

Les trois types d'activités cognitives décrites en conception individuelle (voir point 2.2) sont aussi mobilisés en conception collaborative. Ainsi, les acteurs doivent circonscrire et structurer le problème de conception, générer différentes propositions et les évaluer. Nous décrivons ici les particularités de ces activités dès lors qu'elles impliquent plusieurs partenaires.

Tout d'abord, il faut noter que, malgré l'implication de plusieurs acteurs et les besoins de coordination en découlant, l'activité de conception collaborative, à l'instar de la conception individuelle, possède un **caractère opportuniste**. L'organisation des différentes activités cognitives semble cependant plus complexe en conception collaborative qu'individuelle, principalement à cause de la part importante laissée à la spontanéité, du caractère implicite ou explicite de certaines actions et des mouvements argumentatifs observables (Visser, 2001). Les interventions des différents acteurs impliqués dans la conception peuvent en effet être spontanées ou sur demande. Souvent, un certain nombre d'actions (évaluations de solutions, épisodes argumentatifs, contre-propositions, etc.) prennent place sans aucune requête de la part des partenaires. Ainsi, la conception collaborative fait une place importante à l'implicite et aux interventions spontanées.

La **structuration du problème** est largement influencée par des facteurs spécifiquement groupaux. Stempfle & Badke-Schaub (2002) identifient plusieurs éléments qui influencent l'organisation de la conception, et notamment l'intensité de l'analyse du problème et des solutions au sein d'un groupe de conception.

- Un manque de compréhension commune du problème incitera le groupe à approfondir les analyses de celui-ci et des solutions. En l'occurrence, des groupes plus hétérogènes auront besoin de se construire un modèle mental commun de la situation, par un jeu de questions-réponses visant à résoudre les ambiguïtés (*grounding*, voir plus loin). Cette construction d'une vision partagée passe notamment par l'analyse, la décomposition et la structuration du problème de conception.
- Les désaccords et les conflits d'idées impliquent d'approfondir l'analyse du problème ou des situations conflictuelles. Ainsi, certains groupes sont davantage tournés vers la remise en question des idées des autres.
- Un des intérêts majeurs du travail d'équipe est l'échange d'idées et le partage de points de vue qui encouragent la réflexivité sur les pratiques et stratégies (*self reflexion*). Cette réflexivité est un élément essentiel d'une conception efficace (Schön, 1983). C'est ainsi que l'utilisation collective des connaissances et des avis complémentaires de chacun permettra de structurer le problème plus en profondeur.
- L'intensité de l'analyse du problème permettra même d'aboutir à de meilleurs résultats et d'éviter les *premature commitments* et les *premature rejections*.

La **génération de solutions** passe essentiellement par un processus d'argumentation. Les idées émises par les uns et les autres sont expliquées aux partenaires pour permettre leur évaluation. Les différentes propositions générées sont souvent suivies d'opinions des uns et des autres et d'arguments visant à justifier les propositions ou émettre des contre-propositions. Les séquences argumentaires sont donc essentielles en accompagnement de la génération de solutions.

L'**évaluation collective** a un rôle central. En effet, c'est à travers ce processus, porté par l'argumentation, que les décisions sont prises par les acteurs. On distingue globalement les mêmes modes d'évaluation en conception collective qu'individuelle : analytique, comparative ou analogique (Bonnardel, 1999, Martin *et al.*, 2001), auxquelles Détienne *et al.* (2005) ajoutent trois modes hybrides : l'évaluation comparative/analytique consiste à analyser en profondeur les qualités et défauts de plusieurs solutions et à les comparer pour opérer un choix. L'évaluation analogique/analytique consiste à analyser en profondeur des solutions passées lors de situations similaires. L'évaluation comparative/analogique consiste à comparer deux solutions à des cas précédents et similaires, pour déterminer les points positifs et négatifs de chacune. En outre, certaines évaluations font appel à des arguments d'autorité (basés sur le statut ou l'expertise d'un participant ou d'un référent extérieur à la réunion).

L'approche argumentaire de ce processus évaluatif est la *critique* (Darses & Falzon, 1996, Oh *et al.* 2004). Il s'agit d'émettre un avis en lui attachant une valence (négative, positive ou intermédiaire). La critique est souvent spontanée, généralement bien argumentée et souvent étendue (une critique négative donne souvent lieu à une contre-proposition). C'est un élément essentiel de l'intérêt de l'action collective pour la collaboration : il s'agit de diversifier les points de vue. Cette utilisation des ressources de chacun et du rôle intensif de la critique, de l'argumentation et de la justification va permettre de détecter des conséquences indirectes des actions et des erreurs potentielles de manière bien plus efficace qu'en conception individuelle. En effet, nous avons montré que les erreurs en conception étaient plus facilement détectées par des observateurs que par le concepteur impliqué dans la décision (Safin *et al.*, 2008a, 2008b). La critique est aussi vecteur de transfert de connaissances.

Dans leur étude sur la conception de cockpits d'hélicoptères, Detienne *et al.* (2005) constatent des chaînes récurrentes de décision. Elles sont d'abord basées sur des évaluations analytiques, puis, en cas de désaccord, sur des évaluations comparatives ou analogiques (éventuellement combinées avec le mode analytique) puis, en cas d'impasse, sur l'utilisation d'arguments d'autorité. Ces derniers mettent en avant le statut ou l'expertise de leur auteur ou d'un référent extérieur pour justifier une décision.

4.4. Activités centrées sur le processus

Dans cette classe d'activité, on retrouve deux modes de synchronisation mis en place entre les acteurs d'un collectif de conception. On retrouve aussi des phénomènes spécifiques, à savoir l'*awareness* et le *grounding*. Le premier est relatif à la conscience mutuelle que les différents acteurs ont les uns des autres. Le second est relatif à la gestion des points de vue complémentaires, à la création et à la gestion d'une intelligibilité mutuelle et d'une intelligence collective.

4.4.1. Deux modes de synchronisation

Deux types d'activités de coordination sont mises en œuvre lors de la conception collaborative. Les premières, principalement impliquées dans la conception distribuée, sont relatives à la synchronisation temporo-opératoire et les secondes, impliquées dans la co-conception, sont relatives à la synchronisation cognitive (Falzon, 1994).

La synchronisation temporo-opératoire vise à remplir deux fonctions, à savoir (1) assurer la répartition des différentes tâches dans le collectif et (2) gérer la dimension temporelle de l'action collective : le déclenchement, l'arrêt, la simultanéité, le séquençage, le rythme des actions à réaliser, etc. La tâche importante ici est de gérer l'interdépendance des tâches (Détienne, 2006). Cette gestion peut se faire de deux manières : avec une approche socio-technique ou avec une approche communicationnelle.

Dans la première approche, il s'agit pour l'organisation de gérer les interdépendances soit en les diminuant (en découpant le problème en entités indépendantes), soit en gérant le projet de manière très stricte, à l'aide de *workflows* et d'outils de gestion de projet. Néanmoins, dans le cas de la conception, cette gestion socio-technique des interdépendances est rendue difficile par les caractéristiques mêmes de la conception : organisation opportuniste, évolution du problème et des objectifs, interdépendance très forte entre les différents composants du problème. Nous verrons néanmoins par la suite que l'utilisation d'artefacts et de représentations externes permet de jouer un rôle dans la coordination et la répartition des tâches entre partenaires (Schmidt & Wagner, 2004).

Dans la seconde approche, la gestion des interdépendances entre acteurs se fait via la communication informelle, qui permet d'établir une coordination en complétant l'information qui échappe aux canaux formels. Elle est clairement favorisée par une co-localisation des acteurs (Olson & Olson, 2000). Plusieurs freins à cette communication sont identifiés (Détienne, 2006) : un manque de volonté de communiquer, par exemple pour garder des zones de pouvoir, des difficultés à établir le contact entre partenaires, notamment dans la collaboration multi-sites et des difficultés dans l'échange d'informations verbales et écrites (notamment le partage de formats de représentations et d'un vocabulaire commun).

L'autre mode de coordination, impliqué principalement dans la co-conception, est relatif à la synchronisation cognitive. Il s'agit de coordonner les différents points de vue et de construire une vision commune du projet. La conception collective est en effet un processus social. Elle est basée

sur la négociation entre les différents acteurs et les différentes disciplines impliquées. Pour que cette négociation puisse s'opérer, il est nécessaire de se comprendre et de se connaître mutuellement. Les activités de résolution collective de problèmes sont influencées par le modèle du partenaire, construit par chaque individu (Falzon, 1994). Il permettra d'orienter la résolution de problèmes et sera aussi utilisé comme critère d'évaluation : l'expertise perçue du partenaire peut aider à juger de la pertinence d'une solution qu'il propose.

La synchronisation cognitive a pour buts principaux, d'une part, de partager une même vue sur la situation et, d'autre part, d'échanger des connaissances générales et techniques relatives au domaine (Darses *et al.*, 1996). Il s'agit ainsi de créer une compréhension conjointe de la situation, un contexte de connaissances mutuelles et un référentiel opératif commun. Les activités de synchronisation cognitive dépendent de la quantité de connaissances partagées entre les collaborateurs.

4.4.2. **Awareness**

Dans des activités de collaboration, et principalement dans les activités de conception distribuée prenant place à distance, la gestion des interdépendances entre tâches et entre acteurs nécessite d'avoir une conscience collective de la situation, des changements opérés sur l'objet de la conception, des tâches à accomplir et des compétences et activités des partenaires. Cette conscience mutuelle est appelée *situation awareness*. En effet, alors que dans les situations de face-à-face les acteurs partagent un contexte commun, l'interaction à distance peut être perturbée par de nombreuses contraintes : réduction de la richesse des canaux de communication (champ de vision réduit, signal sonore perturbé, etc.) et difficulté à partager les objets, représentations et informations (difficulté à communiquer des références spatiales notamment). Pour parvenir à cette conscience mutuelle, il est nécessaire de partager une partie du contexte.

Carroll *et al.* (2003) distinguent plusieurs formes de conscience mutuelle.

- Le *social awareness* (qui est là?) : il s'agit de comprendre quel est le contexte social de l'activité, c'est-à-dire les acteurs impliqués, leur disponibilité à collaborer, etc.
- L'*action awareness* (que se passe-t-il?) : il permet d'être conscient des actions et contributions de chacun sur l'objet de la conception et des interactions entre les différents membres du groupe.
- L'*activity awareness* (comment les choses se passent-elles?) : il s'agit d'avoir une vision plus globale du projet en prenant en compte les interdépendances entre les acteurs et de comprendre quels sont les plans et les compréhensions des différents individus, les rôles de chacun, la distribution des tâches et leur avancement, etc.

Cet *awareness* est crucial pour la collaboration. Il apparaît que la plupart des erreurs, lors de la conception, sont dues à une méconnaissance des actions ou compétences de ses partenaires (Busby, 2001).

La conscience mutuelle passe par des actes de communication, directs ou indirects. Un élément essentiel d'une bonne coordination, et à l'inverse une des causes principales d'apparition des erreurs dans les systèmes de conception distribués, est le *cueing*, c'est-à-dire la communication et l'interprétation d'indices permettant de déclencher des actions de la part des collaborateurs (Busby, 2001). Ces indices peuvent être explicitement donnés ou être intégrés dans les outils de communication et de collaboration des équipes de conception. A ce titre, les documents échangés et les annotations permettent de fournir des indices de l'avancement d'une tâche et des actions de chacun (Schmidt & Wagner, 2004).

La qualité de la situation *awareness* dépend de plusieurs facteurs (Carroll *et al.*, 2003) : (1) la nature de la tâche, qui nécessite une plus ou moins grande conscience mutuelle pour être menée à bien ; (2) les facteurs de la situation, qui facilitent ou rendent difficile la communication d'indices ;

(3) les facteurs groupaux, comme l'habitude de travailler ensemble et la volonté de communiquer ; et (4) les instruments utilisés. Ceux-ci soutiennent la conscience mutuelle de la situation à des degrés divers : de la conversation téléphonique, ou du mail, ne véhiculant aucune information contextuelle, à des systèmes multimodaux riches, permettant de convoier de nombreux indices pour l'*awareness* (gestes de pointage, visage des partenaires, espace de travail partagé, etc., Dumazeau & Karsenty, 2004). Les instruments de collaboration, pour soutenir une conscience mutuelle sur laquelle les acteurs peuvent se reposer pour collaborer, doivent permettre de maintenir une vision globale du processus collaboratif, qui soit plus que de simples notifications d'activité.

4.4.3. Gestion des points de vue et *grounding*

La conception, dès qu'elle se veut innovante, fait appel à des acteurs de disciplines différentes en vue de définir et construire un objet (Beers *et al.* 2006). Cette implication d'acteurs multiples nécessite d'intégrer les différentes perspectives et de construire et négocier une inter-compréhension. Ces mécanismes de gestion de l'inter-compréhension passent, en conception, par la gestion des points de vue de chacun (Détienne, 2006 ; Detienne *et al.*, 2005). Ces points de vue sont fortement influencés par les responsabilités, compétences et intérêts de chacun et servent de base à la négociation des différents choix et propositions. Dans le domaine de la conception, le point de vue est la représentation personnelle, pour un acteur particulier, de l'objet à concevoir. Les points de vue peuvent être compris comme des assemblages spécifiques de contraintes : l'importance accordée à chacune de ces contraintes, leurs niveaux de détails, voire même leurs significations, varient en fonction des individus (Martin *et al.*, 2001). Le point de vue d'un acteur est contextuel : « *il s'agit d'une production externe, publique, ancrée socialement dans une activité collective* » (Wolff, Burkhardt, & De La Garza, 2005, p. 259).

Martin *et al.* (2001) distinguent plusieurs types de points de vue.

- Le point de vue partagé est la combinaison de contraintes communes à tous les membres du groupe, indépendamment de leur discipline. A noter qu'il peut y avoir des ambiguïtés dans la signification qu'accordent les participants à un certain nombre de contraintes.
- Les points de vue spécifiques à la spécialité. Ils regroupent les contraintes propres à chacun des domaines impliqués dans la conception (performance énergétique, acoustique, structure, etc.). Ces points de vue peuvent évoluer dans le cours de la conception en fonction des différents épisodes argumentatifs.
- Les points de vue intégrés, qui sont des combinaisons partagées de contraintes spécifiques à des domaines différents. A nouveau, il peut y avoir des ambiguïtés dans les significations attribuées par les différents partenaires aux contraintes.

Ces différents points de vue sur l'objet doivent être coordonnés et intégrés, pour construire une vision commune. Ce mécanisme, appelé *grounding*, vise la construction d'un espace de références commun, consistant en l'ensemble des connaissances que les membres du groupe ont en commun et sont conscients d'avoir en commun. Cet espace partagé est appelé *common ground* (Clarck & Brennan, 1991), référentiel opératif commun (de Terssac & Chabaud, 1990) ou *joint problem space* (Roschelle & Teasley, 1994). Il ne s'agit plus uniquement de comprendre qui entreprend quelle action et comment la tâche se déroule globalement, mais bien de construire une inter-compréhension forte pour se comprendre et résoudre le problème ensemble. Ce *grounding* concerne à la fois le problème (un cadre pour la génération et l'évaluation des solutions) mais aussi les procédures et représentations ainsi que la connaissance que les partenaires ont les uns des autres. La négociation de ce *common ground* est un préalable à la négociation des solutions.

Ce *common ground* est pragmatique et orienté vers l'action (opératif). Pour Beers *et al.* (2006), la construction de la vision partagée passe par l'explicitation des connaissances propres à chaque individu et leur appropriation par les autres. Une fois les connaissances appréhendées, les participants s'engagent dans un processus de double négociation afin de construire leur référentiel

commun. La négociation porte sur la signification des contributions des différents partenaires et sur leurs positions et avis, en d'autres termes, sur leur point de vue. Dans cette négociation, chaque partenaire s'assure que les autres comprennent bien les connaissances et le jeu de contraintes mobilisés par chacun. Il se construit essentiellement par l'interaction verbale (Roschelle & Teasley, 1994) et est grandement facilité par un haut degré d'*awareness*. Des méthodes et formalismes existent pour soutenir cette construction du *common ground* : il s'agit de permettre à chaque individu d'externaliser les connaissances qu'il souhaite mettre en jeu dans la situation collaborative.

Cet espace de références partagé a comme principal intérêt qu'il permet de faciliter les échanges, les négociations et les argumentations pour la résolution du problème et pour la conception. Ainsi, une fois que tous les participants ont acquis une vision claire des rôles, intentions et compétences de chacun, la génération et l'évaluation des solutions s'en trouvent facilitées. Le *grounding* participe donc à la structuration du problème, mais centrée sur les membres du groupe.

En soutien à cette construction du *common ground*, les supports informatiques devraient permettre de désambigüiser le langage, d'aider à l'articulation des tours de parole, et de fournir des représentations qui permettent de soutenir l'inter-compréhension (Roschelle & Teasley, 1994).

En synthèse, les activités centrées sur le processus consistent en trois catégories principales :

la synchronisation des acteurs, qui peut se faire sur une base opératoire (il s'agit de coordonner ses actions) ou sur une base cognitive (il s'agit de coordonner ses connaissances, ses idées et ses points de vue) ;

le maintien d'une conscience mutuelle des autres et de leurs actions, qui sera d'autant plus nécessaire si les actions se déroulent à distance ou séparément ;

la construction d'un référentiel commun, qui permet aux acteurs de développer une « intelligence collective », par le partage de leurs connaissances et de leurs avis.

*A noter que l'*awareness* et le *grounding* sont deux façons d'intégrer les actions des partenaires. Le premier est une version « minimale » consistant simplement à se faire une idée du déroulement de la collaboration. Le second est une version bien plus complète de l'intégration, visant à rapprocher et coordonner les points de vue, et pas uniquement l'action.*

Les deux modes de collaboration en conception évoqués précédemment font appel aux activités centrées sur le processus à des degrés divers (tableau 1). Cette dichotomie n'est cependant pas stricte : chaque activité collaborative pourra comprendre des épisodes des deux modes et/ou des versions intermédiaires.

	Co-conception	Conception distribuée
Type de collaboration	Versions « intégrées » de la collaboration.	Versions « découplées » de la collaboration.
Focus	Concevoir ensemble l'objet.	Se répartir les tâches et se coordonner pour que chacun puisse mener sa mission.
Mode de synchronisation privilégié	Synchronisation cognitive.	Synchronisation temporo-opératoire.
Awareness	La conscience des activités des autres est nécessaire.	Important : la conscience de « qui fait quoi » est essentielle pour le bon déroulement de la collaboration.
Grounding	Référentiel opératif commun nécessaire : le partage des points de vue permet une intelligibilité mutuelle.	Pas de référentiel commun obligatoire. Chacun travaille sur des tâches différenciées.
Temporalité	Episodes synchrones fréquents.	Travail essentiellement asynchrone (ou synchrone avec peu d'interactions).

Tableau 1

Caractérisation des processus de co-conception et de conception distribuée

4.5. Activités de gestion de l'interaction

Une troisième classe d'activités impliquées dans la pratique collaborative consiste à gérer l'interaction entre les acteurs. Nous envisageons ici deux points relatifs à cette problématique, à savoir la communication et l'interaction à distance.

4.5.1. Communication et collaboration

La communication est un élément essentiel de toute collaboration. Ces deux activités entretiennent un double rapport : d'une part, la communication, directe, indirecte, verbale ou non verbale, est un médiateur essentiel de la collaboration et, d'autre part, il est nécessaire de coopérer pour dialoguer, en fournissant au partenaire et en prélevant dans la situation des indices visant à gérer le bon fonctionnement de la communication (Falzon, 1994). La communication en conception varie selon plusieurs dimensions (Maher *et al.*, 2010) : son mode (asynchrone ou synchrone), son type (communication directe entre les acteurs ou indirecte, par des modifications des représentations de l'objet), son contenu (sur le problème ou sur le processus) et sa structure (quels types de réseau de communication). Elle est d'une importance particulière dans les situations de conception collective car celles-ci sont régies par des mécanismes d'argumentation, eux-mêmes portés par le langage.

La communication possède plusieurs propriétés essentielles dans les situations de collaboration. Il faut d'abord noter que les communications échangées dans un collectif ne sont pas toujours

intentionnelles. De nombreuses informations transitent d'une personne à l'autre sans que cela soit désiré (« il est impossible de ne pas communiquer », premier axiome de la communication de Watzlawick & Helmick, 1979). L'activité du partenaire est à tout moment une source d'informations importantes dans les activités collectives.

Dans les activités de résolution de problèmes complexes, en particulier dans la conception, la communication peut être particulièrement élaborée, prenant en charge toutes les fonctions précédemment citées, directement relatives au problème, liées à l'établissement de connaissances mutuelles et liées à la gestion du dialogue. Les communications sont souvent pluri-fonctionnelles, dans le sens où elles servent plusieurs objectifs en même temps (Falzon, 1994). Ainsi, une note d'humour pourra avoir comme but de créer ou renforcer les liens dans l'équipe, tout en véhiculant l'information que le processus est sous contrôle.

La communication est par essence multimodale, c'est-à-dire qu'elle est portée à la fois par le discours verbal et par d'autres modalités de communications que sont les dessins, les gestes ou les directions du regard. Dans les domaines de la conception, où l'interaction graphico-gestuelle est importante (Détienne, Visser, & Tabary, 2006 ; Détienne & Visser, 2006), il est particulièrement intéressant de comprendre le rôle de chacun de ces modes de communication. Cette multimodalité est étudiée en interaction homme-machine en vue de comprendre les rapports qu'entretiennent plusieurs canaux de communication entre eux pour faire transiter une information. Le modèle CARE (Coutaz & Nigay, 1994) définit quatre types de lien entre modalités d'échanges : l'assignation (chaque type d'information transite par un canal particulier), la redondance (une information peut transiter en même temps par différents canaux pour renforcer la portée du message), la complémentarité (différentes modalités permettent de faire transiter différentes parties du message) et l'équivalence (un canal peut être substitué à un autre), auxquels on peut ajouter la notion de concurrence (les informations amenées en parallèle sont conflictuelles car contradictoires, Martin, 1998). Ces relations de multimodalités peuvent éclairer la description des communications entre humains, principalement si elles sont médiatisées par des dispositifs de communication ou de collaboration.

Falzon (1994) propose ainsi plusieurs exemples de rapports multimodaux dans les interactions collaboratives.

- Les événements référentiels dans la communication, comme les déictiques²⁹, font souvent appel à plusieurs modalités. Un exemple typique consiste à pointer un élément en le référant verbalement (« celui-ci »).
- Les démonstrations, où un participant effectue des actions tout en les commentant. Les deux modes d'information sont ici nécessaires à la bonne compréhension du message.
- Le suivi d'action, où un participant contrôle et commente les actions de l'autre. Les deux modes d'informations sont nécessaires, mais répartis entre les participants.
- L'explicitation, où un élément est expliqué à la fois verbalement et graphiquement.
- La négociation lexico-graphique, où il s'agit pour les différents partenaires de s'accorder sur les significations des éléments graphiques.

Détienne et Visser (2006) observent aussi que ces rapports multimodaux peuvent être distribués parmi les personnes : un croquis dessiné par l'un pourra être expliqué par l'autre.

Pour communiquer, il est nécessaire d'élaborer un message, mais aussi de vérifier que ce message a bien été compris. Il s'agit aussi de fournir des indices et des preuves (*positive*

²⁹ Les déictiques sont des mots désignant, sans le nommer explicitement, un référent présent dans la situation, et sont souvent accompagnés de gestes ou de directions du regard permettant d'identifier le référent. Des énonciations de type déictiques sont des mots tels que « ceci, là, demain, etc. ». Ils n'ont de sens que dans l'ici et maintenant de la communication.

evidence) à son(ses) partenaire(s) pour montrer explicitement la bonne compréhension du message : acquiescements, confirmations, amorce du tour de parole suivant, etc. (Clarck & Brennan, 1991). Ces activités, en principe simples dans le cas de communication en face à face utilisant le langage courant, peuvent se compliquer en cas de communication à distance, asynchrone ou avec un haut degré de technicité ou d'abstraction.

Dans la communication, Clarck & Brennan identifient le principe du moindre effort collaboratif : « *In conversation, the participants try to minimize their collaborative effort - the work that both do from the initiation of each contribution to its mutual acceptance* » (p. 135). A chaque acte de communication est associé un certain nombre de coûts, dépendant du média utilisé. Certains de ces coûts sont à la charge du locuteur : coûts de formulation (préparation de l'énonciation) et de production (acte énonciatif : parler, écrire, etc.). D'autres sont à la charge du récepteur : coûts de réception (lecture, écoute, temps d'attente) et de compréhension (décodage du discours). D'autres, enfin, sont à charge des deux interlocuteurs : coûts de démarrage, de délais, d'asynchronie, de changement de locuteur, de désignation, de fautes et de réparations. Ce principe d'économie dans la communication est aussi bien connu dans les collectifs de travail d'experts. C'est ainsi que les opérateurs, à mesure qu'ils se connaissent et connaissent la tâche, développent un langage opératif, plus efficace et moins coûteux. Ce principe d'économie des communications a notamment été rapporté dans le domaine des communications en salle d'opération, qui tendent à changer de nature avec l'expertise des chirurgiens collaborant (Blavier & Nyssen, 2010).

Les différents coûts de la communication sont associés aux contraintes des environnements de partage et de support à la collaboration. Les médias de communication peuvent être caractérisés par plusieurs propriétés qui peuvent faciliter les échanges et la construction d'un référent commun partagé (Clarck & Brennan, 1991).

1. La coprésence : les collaborateurs partagent le même environnement proche.
2. La visibilité : ils peuvent se voir.
3. L'audibilité : ils peuvent s'entendre.
4. La co-temporalité : le récepteur reçoit le message au moment où il est produit par l'émetteur.
5. La simultanéité : les différents collaborateurs peuvent émettre des messages en même temps. Cela est notamment important pour que le récepteur puisse envoyer des confirmations de sa bonne compréhension à mesure qu'il reçoit le message de l'émetteur.
6. La séquentialité : les différents messages se suivent directement, sans interruption par des activités annexes. Les conversations en face-à-face permettent cette séquentialité, gérée par des tours de parole. Par contre, dans un échange de courriers électroniques, les messages successifs peuvent être entrecoupés par d'autres activités.
7. Le réexamen (*reviewability*) : les messages possèdent une trace qui peut être réexaminée plus tard.
8. La révision (*revisability*) : les messages peuvent être vérifiés et révisés avant leur émission. Les erreurs de communication, dans les interactions face-à-face, doivent être généralement récupérées publiquement, contrairement aux emails qui peuvent être relus et permettre cette récupération avant l'envoi.

Chaque dispositif de communication possède certaines de ces caractéristiques. Les interactions face-à-face, par exemple, comprennent les six premières. Le téléphone comprend les dimensions d'audibilité, de co-temporalité, de simultanéité et de séquentialité. La visioconférence ajoute un critère de visibilité. Les systèmes de *chat* permettent la simultanéité, le réexamen et, selon le cas, la co-temporalité (si les lettres s'affichent à mesure qu'elles sont tapées) ou la révision (si le message doit être terminé avant envoi).

La présence ou l'absence de ces différentes caractéristiques engendre des coûts supplémentaires pour la communication. Les problèmes de communication et les conflits peuvent impliquer des

ruptures dans l'intelligibilité mutuelle et nécessiter des activités de « réparation » de l'interaction (Roschelle & Teasley, 1994).

4.5.2. Rôle de la distance

De plus en plus d'activités de conception, et d'activités collaboratives en général, se déroulent à distance. En conséquence, de nombreux dispositifs technologiques sont créés pour soutenir ce type d'activité, en essayant de le rapprocher au maximum des conditions de coprésence.

Olson & Olson (2000) identifient dix caractéristiques des situations de coprésence qui leur fournissent un avantage certain, en comparaison aux situations à distance :

- le *feedback* rapide dans la communication ;
- les multiples canaux de communication ;
- les informations personnelles relatives aux contributeurs (qui permettent d'attribuer un contexte aux interventions) ;
- les grandes possibilités de nuances dans l'expression, notamment avec la participation de la communication non-verbale ;
- le contexte local partagé, en termes de temps (fuseau horaire) et d'espace (événements proches) ;
- les interactions informelles prenant place avant et après les réunions formelles ;
- la co-référence aux objets, permettant l'utilisation de gestes pour identifier le référent d'une énonciation déictique ;
- le contrôle individuel sur la direction de l'attention et la flexibilité dans les changements de focus attentionnel ;
- les indices implicites, indices contextuels périphériques ;
- la spatialité de la référence, permettant de se référer spatialement aux objets.

Selon eux, certaines de ces propriétés seront, dans un avenir proche, correctement reproduites à distance avec l'évolution de la technologie. Le *feedback* rapide et la multiplication des canaux en sont deux exemples. D'autres, comme la spatialité des références ou les indices implicites, pourront l'être mais de manière peu efficace. Enfin, le contexte partagé ne pourra jamais être reproduit à distance.

Ces différentes propriétés peuvent être plus ou moins bien soutenues par les technologies de travail collaboratif assisté par ordinateur (*computer supported collaborative work - CSCW*) ou les dispositifs de communication à distance. Néanmoins, les réels soutiens de ces dispositifs identifiés dans la littérature sont parfois ambigus ou contradictoires. Foulon-Molenda (2000) montre que l'apport de la modalité visuelle dans la communication à distance est assez controversé : suivant le contexte (nombre de personnes et types de tâches), la présence du canal visuel pourra être ou non, un facilitateur à la communication. Elle insiste sur la nécessité de comprendre ces améliorations conjointement à une analyse approfondie de l'activité.

Les résultats des études visant à évaluer l'impact de la distance en conception sont souvent contradictoires. Par exemple, Tang, Lee & Gero (2010) ne trouvent aucune différence dans les activités cognitives de concepteurs travaillant à distance ou en coprésence. Détienne *et al.* (2004) montrent qu'à distance, les activités collaboratives ne sont pas affectées mais que la quantité d'activités spécifiquement tournées vers la gestion de l'interaction (tours de parole, régulations, gestion de l'écoute, etc.) est augmentée. Gronier & Sagot (2007) montrent, par l'analyse comparative des échanges verbaux de deux groupes, un en coprésence et l'autre à distance, par téléphone, que la nature même de l'activité de conception est largement affectée par la distance :

la gestion du projet est appauvrie, se cantonnant à des niveaux très généraux, et les échanges ne portent plus sur l'entièreté de la complexité du processus de conception, mais essentiellement sur la résolution de problèmes techniques.

La distance est donc un facteur multidimensionnel. Il est nécessaire de comprendre ce rôle non pas en soi, mais en fonction des instruments qui médiatisent le travail distant. Olson & Olson (2000) notent aussi que les technologies futures permettront potentiellement de fournir des capacités de communication à certains points de vue supérieures à celles fournies par le cadre de la coprésence.

4.6. Objets médiateurs en conception collaborative

En conception collaborative, les représentations externes jouent un rôle central. Elles sont l'intermédiaire entre les acteurs du processus et jouent le rôle d'*objets médiateurs* (Mer, Jeantet, & Tichkiewitch, 1995). Les représentations externes utilisées en conception remplissent plusieurs rôles (Boujut & Blanco, 2003).

Tout d'abord, les plans, modèles et esquisses sont avant tout une représentation de l'objet architectural. C'est sur ces représentations, et à travers elles, que se déroule le processus de conception. Elles possèdent donc un rôle de **transformation**, c'est-à-dire de construction de l'objet. Comme en conception individuelle, c'est au travers des représentations que se construit l'objet de la conception. Ainsi, les différents documents sont modifiés en cours de conception, à mesure que les décisions sont prises. Les représentations évoluent vers un plus haut degré de précision (Lebahar, 1983). Quand l'activité de conception est coopérative, le processus de transformation est collectif. Les documents sont partagés, réinterprétés par les uns et les autres et sont des supports d'expression d'idées (Détienne *et al.*, 2009). Ils sont des outils de production de concepts et de prise de décision distribuée (Darses et Falzon, 1996).

Ensuite, leur statut de représentation de l'objet en cours de conception possède un rôle essentiel de **transmission d'information** entre les différents acteurs de la conception. Le plan ou l'esquisse est un moyen de transmettre, de manière plus ou moins formelle, plus ou moins structurée et plus ou moins ouverte, des consignes et informations aux collaborateurs. Ce rôle est particulièrement important dans le cadre de larges collectifs de conception. Outre ce rôle de transmission, elles constituent aussi des traces des décisions (Détienne *et al.*, 2009). Les esquisses construites en situation fourniront aussi des traces informationnelles à partir desquelles vont être élaborées les autres représentations intermédiaires (Traverso, 2009).

Enfin, les représentations externes en conception sont des **supports à la collaboration**. Les différents plans, maquettes, esquisses échangés sont des vecteurs à la fois de synchronisation temporo-opérateur et de synchronisation cognitive.

- D'une part, la collection de représentations de l'objet architectural est un moyen très puissant de coordination des différentes tâches de chacun autour du projet. La nomenclature des différents artefacts (plans, esquisses, textes, images, etc.) dans un projet, permet d'identifier les différentes composantes, mais aussi d'assurer leur validation, en explicitant de manière précise des informations telles que la date, l'auteur, le type d'informations ou la version. La division du travail, la coordination et la planification sont aussi gérés par l'intermédiaire des représentations : les différents types de plans (coupes, détails, étages, etc) et les couches (*layers*) des modèles CAO/DAO permettent de séparer les différentes informations du bâtiment, et donc de diviser les tâches. Mais ils permettent également d'intégrer ces informations de nature très différente, dans une seule et même représentation, ce qui facilite la coordination. L'organisation en *layers* permet

aussi de réduire la complexité du plan d'ensemble. Les différents documents utilisés pour des projets sont donc des systèmes d'ordonnancement à part entière (*ordering systems*, Schmidt & Wagner, 2004).

- D'autre part, la co-construction des objets intermédiaires permet de construire une vision commune de l'objet final. Les représentations servent donc de supports à la communication, en tant que modalité d'échange particulière (modalité graphique), complémentaire à la modalité verbale. Elles fournissent aussi un support privilégié pour le *grounding*, en permettant l'externalisation des connaissances de chacun, pour la production de la connaissance commune (Beers *et al.*, 2006).

Dans un exercice de conception de plans d'évacuation, Heiner, Tversky & Silverman (2004) comparent les activités collaboratives de deux interlocuteurs dans deux situations. La première, où les concepteurs agissent en coprésence et possèdent une représentation partagée ; et la seconde situation, à distance, où les artefacts ne sont pas partagés : les deux individus peuvent se parler, ont sous les yeux la même représentation mais ne se voient pas et ne partagent pas le même espace de travail. Ils montrent que la présence de représentations externes partagées et la possibilité de dessiner sur le même plan remplissent deux rôles.

- Premièrement, les représentations permettent plus d'interactivité. En conjonction avec les différents gestes, le partage du dessin permet d'établir un contexte de référence commun et de capturer l'attention des deux concepteurs sur des éléments précis à résoudre. Les auteurs observent que dans la condition en coprésence, l'attention est dirigée vers le dessin et les individus travaillent ensemble sur les mêmes parties du problème. Dans la situation à distance, le problème est divisé en sous-tâches coordonnées à un haut niveau. La présence d'un espace de représentations partagé et interactif serait donc un préalable nécessaire aux activités de co-conception.
- Deuxièmement, les représentations sont utilisées en complément avec les gestes. La plupart des gestes sont porteurs de significations, et sont généralement effectués à même la représentation externe afin de véhiculer de l'information spatiale et temporelle. Ainsi, les deux modes de communication que sont le geste et le dessin sont complémentaires dans les situations de conception : ils permettent de faciliter l'établissement d'un *common ground*. Ceci est cohérent avec les résultats de Dumazeau & Karsenty (2004), qui montrent l'intérêt de disposer de dispositifs de pointage pour collaborer à distance sur le même espace de travail. La présence de dessins partagés permet de simplifier la communication : ce qui ne peut être dessiné ou pointé doit être explicitement dit.
- Enfin, la présence d'un espace de dessin partagé permet d'aboutir à de meilleurs résultats en moins de temps, et encourage la création d'une solution intégrée, plutôt que deux solutions coordonnées. En outre, elle fournit une expérience plus plaisante aux collaborateurs.

Les représentations externes sont donc à la fois des supports de conception, des résultats de cette conception et des moyens de collaboration. Ces multiples fonctions des représentations en conception engendrent un intérêt à disposer de moyens d'expression souples et immédiats. Ainsi, les outils de CAO/DAO ne sont pas très pertinents de ce point de vue : les contraintes qu'ils impliquent rendent les possibilités de transformation en temps réel difficiles, l'expression créative ardue et leur utilisation aboutit en conséquence à des objets intermédiaires relativement « fermés ». L'esquisse, par contre, possède certaines qualités qui permettent son usage comme instrument puissant de pensée collective.

4.6.1. Annotations

Une particularité des représentations externes en conception collaborative tient au fait que, en tant que vecteurs de transmission d'informations, elle sont souvent le support à des échanges d'idées sous une forme graphique. C'est ce que nous appelons les annotations. Alors que, contenant de l'information explicite, les objets intermédiaires de conception tels que les plans et modèles

peuvent être considérés comme « fermés », l'annotation est une pratique collective essentielle permettant d'« ouvrir » les documents. Ainsi, dans des réunions de travail, les plans, maquettes, modèles et esquisses sont souvent modifiés grâce à du dessin à main levée ou à des notes textuelles.

Le rôle des annotations en conception architecturale est encore largement méconnu. L'essentiel des travaux sur les annotations a été mené dans le domaine du web ou dans celui de l'écriture de textes (Zacklad, 2006). Ces études peuvent nous renseigner sur certaines caractéristiques de ce processus, mais diffèrent largement des pratiques rencontrées en architecture où l'annotation possède souvent un caractère analogique, contrairement aux notes, surlignages etc. dans un texte³⁰.

Néanmoins, certaines études ont porté sur l'usage de la modalité graphico-gestuelle dans la conception architecturale collaborative (Détienne & Visser, 2006 ; Visser, 2009a ; Heiner *et al.*, 2004). Mais ces études n'ont pas investigué spécifiquement le contenu et la structure graphique de ces annotations. Elles sont considérées comme un moyen de communication parmi d'autres mais, compte tenu du nombre restreint de méthodes pour analyser les traces graphiques (Détienne *et al.*, 2009), elles n'ont pas été envisagées dans ces études pour leurs spécificités. Les quelques travaux portant sur les pratiques d'annotation ont été menés dans le cadre de la conception mécanique (Boujut, 2010 ; Boujut, Darses, & Guibert, 2006 ; Zacklad *et al.*, 2003).

Il convient de distinguer clairement deux modes d'annotation. Les premières servent à la communication asynchrone. Elles sont des commentaires et visent à ajouter une information au document sur lesquelles elles s'inscrivent. Elles doivent pouvoir être récupérées et relues par d'autres personnes à d'autres moments. Elles sont donc des objets en soi. Les secondes servent à la communication synchrone. Il s'agit de notes, de croquis, de schémas, utilisés dans des réunions de collaboration pour soutenir le discours. Elles n'ont pas nécessairement d'existence propre, ni de vie au-delà de la réunion. Elles servent à compléter l'information verbale ou non-verbale pour soutenir le processus argumentaire. « ... les annotations, en tant que supports des débats collectifs, permettent d'instrumenter les processus complexes de synchronisation des activités et de régulation collective des activités coopératives » (Zacklad *et al.*, 2003, p. 2).

Dans une analyse sémiotique des annotations, Zacklad (2006) distingue trois types d'annotations, essentiellement à caractère asynchrone.

- Les annotations attentionnelles qui ont pour objectif d'attirer le récepteur sur certains éléments du document cible.
- Les annotations associatives qui permettent de relier le document annoté ou une partie de ce document à d'autres documents ou parties de documents. C'est typiquement le cas des notices bibliographiques au sein de documents textuels.
- Les annotations contributives permettent de compléter le document initial par un ajout d'informations.

Si ces types d'annotations sont particulièrement bien distincts dans les productions textuelles (surlignage pour les premières, ancrs et renvois pour les secondes et notes en bas de page pour les troisièmes), la distinction nous semble moins nette dans le cas d'activités essentiellement graphiques telle que la conception architecturale. La catégorisation présentée ici n'entretient pas de correspondance avec la structure formelle d'une annotation. Ainsi, un surlignage pourra être une mise en évidence de certains éléments du dessin dans le but de soutenir une attention partagée, mais pourra aussi être un media d'ajout de contenu avec, par exemple, la mise au net de certaines parties du dessin.

³⁰Le terme même d'annotation possède un caractère ambigu. Rappelons que nous considérons comme annotation tout ajout textuel ou graphique superposé à un document préexistant.

En architecture, Boulanger, Decortis & Leclercq (2006) identifient 5 types d'annotations sur les représentations externes, plans et croquis, en usage individuel : les cotes, les notes textuelles, les dessins de détail, les dessins complémentaires en élévation, les symboles et les corrections. Ces annotations remplissent plusieurs fonctions : exprimer des idées rapidement et de manière économique ; identifier des parties du document annoté, notamment en les nommant ; préciser des éléments ambigus du dessin ; agir comme aide mnémonique pour le rappel ultérieur, comme dans le cas de notes personnelles ; ou corriger le plan, l'esquisse ou une annotation préalable. Le nombre d'annotations tend à augmenter à mesure de l'avancement de la conception.

Boujut, Darses & Guibert (2006), dans le domaine de la conception mécanique, font la distinction entre les annotations à visée individuelle et les annotations collectives. Ces dernières sont principalement effectuées sur des documents non clôturés et sont essentiellement utilisées dans des réunions de revue de projets pour se coordonner et comme support au discours. Dans une situation expérimentale, ils constatent, par l'observation de séances de collaboration synchrone, outillées notamment avec un tableau électronique, que l'essentiel des annotations sont de nature graphique, avec moins de 10% d'annotations textuelles. Parmi ces annotations graphiques, ils identifient deux grandes classes.

- Les annotations déictiques (environ un tiers) sont des « pointeurs » pour mettre en avant certains éléments du dessin. Formellement, il s'agit de surlignages, cercles, ratures ou flèches. Ces annotations n'ont de sens que dans le cours de la réunion et ne sont pas réutilisées par la suite.
- Les annotations figuratives (environ deux tiers) sont des éléments de la solution, des représentations imagées de certaines contraintes d'un problème ou encore des informations ponctuelles telles que des flèches représentant des mouvements. Ces annotations font plus que soutenir le discours. Elles participent à la génération de solutions, par la richesse de leur contenu sémantique.

Ils remarquent en outre que les annotations ne servent pas à évaluer les solutions, à expliciter des connaissances générales du domaine, ni à planifier la résolution du problème.

Ils concluent sur l'utilité des outils d'annotation, synchrone ou asynchrone. A ce titre, l'esquisse numérique possède la souplesse nécessaire à ce mode d'expression.

4.7. Qualité de la collaboration

L'objectif des technologies de soutien à la collaboration est de permettre un travail de qualité. Ainsi, pour évaluer l'impact d'une technologie de collaboration, il convient d'opérationnaliser la notion de qualité de la collaboration. Cette notion pose quatre classes de questions (Safin, Burkhardt, Buisine, Kahrmanis, & Charoy, 2010).

- Quels sont les déterminants de la collaboration? Il s'agit de comprendre les dimensions importantes du processus collaboratif et de son adaptation à différents domaines d'application.
- Qu'est-ce qu'une collaboration de qualité? Cette question est d'une importance cruciale. La qualité de la collaboration est nécessairement vue en rapport avec des référents, souvent dans des approches normatives. Il est nécessaire, si l'on veut évaluer la collaboration, d'explicitier ces référents, normes et valeurs attachés à la collaboration. De ce point de vue, la question de l'équilibre des contributions entre chacun des membres d'un collectif est éloquent. Dans une certaine vision de la collaboration, notamment dans les approches pédagogiques, une répartition équilibrée des interventions de chacun est un signe d'un climat de qualité et est porteur de plus-value pour les membres du groupe. Dans un autre point de vue, où c'est le résultat qui est

privilegié, une « bonne » collaboration nécessitera de tirer au mieux parti des compétences différentes, et donc, par exemple, d'allouer plus d'espace d'expression aux experts.

- Quel est le lien entre la qualité de la collaboration et le résultat de l'activité? Une « bonne » collaboration engendre-t-elle systématiquement un « bon » résultat? La qualité de la collaboration doit-elle être définie en fonction des résultats qu'elle permet? Les relations entre processus et résultats sont complexes et ce, plus encore en conception architecturale où le produit est particulièrement difficile à évaluer. Il convient aussi de définir quels sont les résultats attendus de la collaboration : uniquement le produit ou aussi les apprentissages (formels et informels) et les aspects sociaux (bien-être, lien social, motivation, etc.)
- En corollaire à ces différentes questions, comment mesurer la qualité du processus collaboratif et de ses résultats?

Plusieurs méthodes existent pour caractériser, décrire et évaluer un processus de conception. Les analyses de protocoles avec schèmes de codage permettent de décomposer et quantifier les différentes interventions des membres d'un groupe dans une activité collaborative. Les *log files* permettent de recueillir automatiquement des données comportementales. Ces deux types de méthodes posent néanmoins des problèmes dans leur application : les premières sont généralement très coûteuses en temps, et les secondes fournissent des informations qu'il est difficile d'interpréter en soi sans une analyse conjointe de l'activité (Spada, Meier, Rummel, & Hauser, 2005). En outre, ces méthodes fournissent des données quantitatives qui permettent difficilement d'adresser spécifiquement la question de la qualité de la collaboration. Par exemple, de nombreuses interventions visant la coordination peuvent être signe d'une « bonne » collaboration, mais peuvent aussi empiéter sur la réalisation de la tâche en cours, ou être un signe de difficultés à se coordonner.

Pour pallier à ces difficultés, une réflexion importante est menée par des chercheurs fribourgeois sur les méthodes d'analyse de la qualité de la collaboration dans les groupes d'apprentissage, dans le domaine du *Computer-Supported Collaborative Learning* (CSCL). Ainsi, Spada et ses collaborateurs (Meier, Spada, & Rummel, 2007 ; Spada *et al.*, 2005) ont proposé une méthode originale pour caractériser la collaboration d'un point de vue qualitatif. La méthode est construite par une approche combinée de démarche ascendante (guidée par les observations de terrain) et descendante (guidée par la théorie, en vue d'avoir un caractère généralisable). Elle comprend 9 dimensions relatives au processus de communication, à la gestion de l'information et aux aspects motivationnels. Chaque dimension est décrite par un score (échelle d'évaluation en 5 points), plutôt que par un codage exhaustif des comportements. Ce jugement qualitatif permet une application plus simple et rapide qu'un schème de codage exhaustif, sur base d'enregistrements vidéo. En outre, elle est caractérisée par un taux acceptable de fidélité inter-codeurs.

Cette méthode, conçue initialement dans le domaine du diagnostic médical interdisciplinaire, a été adaptée au domaine de la définition d'algorithmes (Voyiatzaki *et al.*, 2008). La grille a également été étendue par Burkhardt, Détienne et Hébert (Burkhardt *et al.*, 2009 ; Safin, Verschuere, Burkhardt, & Détienne, 2010 ; Hébert, 2008) pour l'adapter spécifiquement au domaine de la conception et pour prendre en compte la dimension instrumentale. Ces travaux ont abouti à une méthode d'évaluation que nous utiliserons dans ce travail (que nous décrivons de manière approfondie dans la méthodologie de la troisième étude, voir chapitre 6, section 4.1). Elle comprend sept dimensions, reliées aux phénomènes décrits précédemment.

1. La compréhension mutuelle soutenue. Cette dimension fait référence aux activités de *grounding* et aux actions tournées vers la synchronisation cognitive.
2. La fluidité de la collaboration. Il s'agit de la fluidité des tours de parole et de l'utilisation des outils.
3. L'échange d'informations pour la résolution de problèmes. Cette dimension englobe le processus de génération de solutions : le nombre d'idées, leur cohérence et leur degré de précision.

4. L'argumentation et la prise de décision. Ce sont les activités d'évaluation de solutions, de prise de décision collective, de critiques et d'argumentation.
5. La gestion de la tâche et du temps. Il s'agit ici des activités relatives à la synchronisation temporo-opérateur : répartition des tâches, gestion du planning, etc.
6. L'orientation collaborative. L'orientation collaborative se réfère à l'équilibre des contributions dans le collectif. Comme évoqué précédemment, cette dimension est discutable. Elle est néanmoins adaptée dans des situations d'apprentissages, où le processus a autant, voire plus d'importance que le résultat.
7. L'orientation individuelle envers la tâche. Il s'agit des aspects motivations de la collaboration, l'engagement de chacun des membres du groupe dans le travail.

4.8. Soutien informatisé à la conception collective

De nombreux outils sont destinés à soutenir le travail collaboratif assisté par ordinateur (CSCW) dans ses différentes étapes. L'enjeu principal est de soutenir la coordination et la communication entre les acteurs. En fonction de l'espace et du temps, on peut distinguer quatre catégories d'outils en soutien au travail collaboratif. (voir tableau 2)

		Temps	
		Synchrone	Asynchrone
Lieu	Espace commun	Réunions de face à face, représentations partagées, tableau.	Post-its, serveurs de documents, documents papiers, PLM.
	Localisations différentes	Téléphone, visioconférence, <i>chat</i> .	Emails, bases de données de documents, PLM.

Tableau 2
Catégories de logiciels de soutien à la collaboration.

Quand les concepteurs interagissent de façon asynchrone, les outils qu'ils utilisent pour communiquer autour du projet sont relativement similaires, qu'ils travaillent dans des lieux communs ou séparés : les serveurs de documents ou les outils de *product lifecycle management* (PLM) permettant de gérer toutes les informations et les documents relatifs à des projets. Les emails sont bien sûr privilégiés pour la communication plus ou moins formelle, et on retrouvera l'annotation de divers documents papier et les notes, dans le cas où les collaborateurs partagent un même lieu de travail.

Quand les équipes de conception se situent sur le même lieu et travaillent en même temps, les réunions en coprésence sont privilégiées. Celles-ci se basent souvent sur la mise à disposition de documents partagés et sur des environnements technologiques rudimentaires ou bien maîtrisés (tableau blanc ou électronique, projection, etc.). Dès lors qu'ils travaillent à distance, la situation se complique : les supports technologiques de la communication, tels que le téléphone, la visioconférence ou les outils de clavardage, ne permettent que des interactions partielles et sont souvent porteurs d'ambiguïté.

Suivant le mode de conception collaborative à soutenir (co-conception ou conception distribuée), les enjeux de l'assistance à la conception sont très différents. Dans le domaine de la conception

distribuée, l'essentiel des défis consiste à fournir des aides à l'*awareness* et à la structuration des tâches : il s'agit de permettre à chacun d'identifier qui fait quoi, comment les tâches sont structurées et quelles sont leurs interdépendances. Cela passe par des systèmes de notification des actions des uns et des autres (Carroll *et al.*, 2003) ou des systèmes de gestion de documents, couramment utilisés en architecture (Schmidt & Wagner, 2004, voir aussi la plate-forme CRTI-WEB, Kubicki, Guerriero, Johannsen, 2009). Ces systèmes, appelés communément « armoires à plans électroniques » commencent à se répandre dans les bureaux d'architecture. Ils permettent, notamment par le biais de nomenclatures adaptées et de systèmes de *versioning*, de gérer le cycle des documents des projets de conception.

L'autre défi d'importance est de soutenir la communication à distance, pour permettre une coordination en temps réel. L'enjeu majeur, selon Darses *et al.*, (2001) est en effet de soutenir des versions « fortes » de la collaboration, c'est-à-dire de la collaboration dans des équipes intégrées, mettant en place des activités de co-conception. Pour ce faire, il est nécessaire d'équiper les concepteurs d'outils permettant de communiquer à distance en temps réel et facilitant l'établissement d'un contexte partagé le plus riche possible (afin de permettre le *grounding*). Il s'agit aussi de développer des environnements en support à l'évaluation collective, et une aide à la traçabilité des décisions.

Si de nombreux dispositifs existent pour soutenir ces différentes activités, Gronier, Brangier, Sagot, & Gouin (2000) notent cependant que les différents systèmes de CSCW impliquent plusieurs classes de problèmes qui freinent leur acceptation : d'une part des problématiques socio-organisationnelles, comme la modification des structures de décision, la redistribution des responsabilités et de nouvelles configurations organisationnelles et, d'autre part, des nouvelles demandes en termes d'activités cognitives et de formats de représentations à échanger.

Pour Olson & Olson (2000), les technologies de travail à distance ne peuvent fonctionner dans les collectifs de travail qu'à la condition que les groupes possèdent trois caractéristiques : que les acteurs se connaissent bien, autrement dit qu'ils aient un haut degré de *common ground*, que leurs tâches soient relativement indépendantes, et qu'ils fassent preuve d'une culture de la collaboration et des technologies de collaboration.

Notre approche de l'esquisse numérique se situe dans ce cadre de l'aide à la communication distante.

Dans cette section, nous avons dressé un tableau des grands concepts liés à la collaboration en conception. Dans un premier temps, nous avons identifié deux modes de conception collaborative :

- la conception distribuée, version « faible » de la collaboration, misant avant tout sur la répartition des tâches et la coordination entre les acteurs ;*
- la co-conception, version « forte » de la collaboration, misant avant tout sur une intégration des connaissances et des points de vue.*

Nous avons ensuite décrit les activités mobilisées par les acteurs de la conception collaborative, que nous avons rangées en trois catégories.

- Les activités centrées sur la tâche, à savoir la formulation, la génération de solutions et l'évaluation. Nous avons montré que la formulation collective du problème dépend de facteur groupaux, que la génération et l'évaluation des solutions passent par un processus argumentaire, et que l'évaluation des solutions est souvent bien plus élaborée en conception collaborative qu'individuelle.*
- Les activités centrées sur le processus, à savoir la synchronisation des acteurs, le maintien d'une conscience mutuelle et la construction d'un référentiel commun. L'importance accordée à ces différentes activités, leur nature et leur nécessité relative dépend du type de conception collaborative mise en place.*
- Les activités de gestion de l'interaction. Nous avons abordé les enjeux de la communication en conception collaborative et insisté sur le rôle de la distance dans des interactions collaboratives.*

Nous avons ensuite décrit l'importance des représentations externes en conception collaborative, par l'intermédiaire de la notion d'objet intermédiaire de conception. Nous avons abordé leur rôle de représentation de l'objet, de transmission de l'information et de support à la collaboration, pour aboutir à la notion d'annotation, essentielle en conception collaborative.

Enfin, fort de tous ces éléments, nous avons décrit un modèle de la qualité de la conception en collaboration, que nous utiliserons dans les études de ce travail, et avons brièvement identifié les enjeux de l'assistance informatique à la conception collaborative.

5. L'esquisse numérique

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'essentiel des logiciels d'aide à la conception sont destinés à supporter les phases de production. Bien que l'architecture dispose de modules logiciels de calculs très efficaces en vue d'évaluer le comportement et la performance du bâtiment (CAO), ceux-ci n'interviennent en effet que très tard dans le processus de définition du bâtiment, car ils nécessitent une description complète de l'objet architectural, inexistante aux stades préliminaires de la conception. Les systèmes de Dessin assisté (DAO), eux aussi, ne sont utiles que relativement tard dans le processus : leur interface requiert de nombreuses actions déclaratives et explicites, qui s'avèrent incompatibles avec le flux de pensée créative des phases préliminaires.

En réponse à cette problématique, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux moyens de soutenir l'activité préliminaire de conception. Pour ce faire, et compte tenu des caractéristiques des étapes créatives du processus, plusieurs outils d'assistance à la conception préliminaire en architecture ont été développés depuis les années 60. Une des voies prometteuses pour réconcilier la souplesse du dessin et les possibilités offertes par l'informatique est d'utiliser le dessin numérique à main levée. Il s'agit d'interagir dans un environnement informatique, avec un stylo électronique, par l'intermédiaire du dessin et au travers d'interfaces épurées et spécifiquement conçues.

L'origine des systèmes graphiques interactifs est généralement située en 1963 avec le prototype Sketchpad (Sutherland, 1964). Ce système, révolutionnaire pour l'époque, définit les principales caractéristiques des applications graphiques interactives qui ne se développeront pourtant qu'une vingtaine d'années plus tard. Bien que ce système ait principalement défini les fonctions traditionnelles des logiciels de CAO et DAO (zoom, modélisation par contraintes, etc.) l'utilisation du *light pen* en fait aussi le premier système de manipulation directe de dessins.

Au début des années 70, la plateforme HUNCH est développée au MIT (Taggart, 1973, Hérot, 1976). Il s'agit du premier système supportant le dessin d'esquisses architecturales à main levée. HUNCH fonctionne en temps réel et envisage, déjà à l'époque, la plupart des problématiques qui sont encore d'actualité dans les systèmes actuels : interprétation de croquis perspectifs, surlignage, création d'un modèle topologique du bâtiment etc.

Les années 80 sont marquées par l'apparition des interfaces WIMP (*Windows, Icons, Mouse, Pointing*). Cette période voit le développement et la progressive démocratisation des outils de CAO/DAO comme Autocad, Archicad ou AllPlan. Peu d'attention est alors portée sur la conception préliminaire. Quelques recherches sont cependant menées, comme Pavlidis & Van Wyk (1985) qui proposent un système de remise au net d'une esquisse en inférant les contraintes graphiques (parallélisme, perpendicularité, etc.) entre les objets composant le croquis.

Vers le milieu des années 90, presque tous les bureaux d'architecture sont largement informatisés par des dispositifs de CAO/DAO, manipulables à la souris. Ceux-ci possèdent d'indéniables avantages qui modifieront peu à peu le travail de l'architecte (Jung, Gross & Do, 1996) : l'édition des plans, la modélisation 3D, le rendu, la simulation, les bases de cas et la collaboration à distance. Mais ils peinent à supporter les étapes créatives de la conception. Ce constat de l'échec des logiciels de CAO/DAO à assister les premières phases de conception entraîne un regain d'intérêt pour les interfaces à stylo, notamment dû aux nouveaux périphériques de capture disponibles sur le marché. Ceux-ci sont de plusieurs ordres.

- Tout d'abord, on retrouve les PC traditionnels. L'interaction se fait soit avec une interface clavier-souris, peu commode pour le dessin, soit avec des tablettes électroniques, qui permettent de manipuler le pointeur de la souris avec un stylo. Dans ce dernier cas, l'interaction se fait sur un espace sans retour visuel. L'action de tracé ne se fait donc pas à même le dessin, mais sur un espace spécifique, alors que le dessin est affiché sur un écran positionné verticalement.
- Une deuxième catégorie comprend différents modèles de tablettes-écran (Wacom en est une des marques les plus répandues). Ces tablettes, dont la taille n'excède actuellement pas le format A3, ont plusieurs avantages : précision de la calibration stylo-tablette, bonne résolution, confort d'utilisation.
- De nombreuses tables multi-tactiles existent dont les plus connues sont le DiamonTouch³¹ et la Surface de Microsoft³². Ces environnements, de plus en plus robustes et précis, permettent de manipuler des éléments de l'espace virtuel avec les doigts. Cependant, aucune d'elles ne permet l'utilisation d'un stylo électronique. Le dessin doit donc se faire au doigt (ou par des dispositifs de stylo imitant le toucher), ce qui implique des problèmes de précision.
- Des solutions mobiles telles que les TabletPC existent, bien qu'elles posent encore de nombreux problèmes d'utilisation : température, poids, autonomie et résolution limitées et reflets (Decortis, Boulanger & Safin, 2007). Ces problèmes mènent actuellement à la disparition de ces technologies, qui tendent à être remplacées par des tablettes tactiles, telles que l'iPad. Celles-ci sont déjà répandues et pallient à ces différents problèmes. Cependant, l'interaction se fait exclusivement par la modalité tactile qui, comme déjà évoqué, n'est pas idéale pour le dessin.
- Plusieurs laboratoires ont développé des environnements de bureaux numériques pour répondre précisément aux besoins des tâches qu'ils souhaitent soutenir. Il s'agit généralement d'assemblages matériels comprenant une surface de travail de grande taille, un stylo électronique et éventuellement une dalle tactile ou des dispositifs de vision par ordinateur pour inclure la composante gestuelle. Le système d'affichage est généralement une projection par le dessus ou par le dessous de la table, le premier posant des problèmes d'ombre, le deuxième étant plus cher, plus difficile à mettre en œuvre et posant des problèmes de parallaxe du stylo réduisant la précision (Aliakseyeu *et al.*, 2006).
- Enfin, la technologie Anoto³³ ouvre la voie vers de nouvelles possibilités. Le système Anoto s'apparente à un stylo ordinaire, comprenant une pointe de stylo-bille pour tracer normalement des dessins sur papier, à laquelle est adjointe une caméra localisant la position de sa pointe sur la feuille de papier réelle³⁴. Cette caméra permet de récupérer le dessin dans un environnement numérique au fur et à mesure de son tracé. Cette technologie peut être combinée avec d'autres environnements d'interaction (dalles tactiles, vision par ordinateur, etc.) pour la création de bureaux électroniques (voir par exemple Haller *et al.*, 2006), ou peut être utilisée en situation de mobilité (carnet et stylo).

Ces différentes possibilités techniques possèdent des avantages et inconvénients (résolution, stabilité, délais de capture, précision, prise en compte de la pression et de l'inclinaison du stylo, retour haptique, découplage entre dessin et visualisation, etc.), qu'il est difficile de synthétiser. En

³¹ <http://www.merl.com/areas/DiamondTouch/>

³² <http://www.microsoft.com/surface/en/us/default.aspx>

³³ <http://www.anoto.com/>

³⁴ En réalité, bien qu'il s'apparente en tous points à du papier ordinaire, le papier Anoto comprend une trame spécifique pour l'interprétation. Cette trame est cependant invisible pour l'utilisateur.

effet, ce ne sont pas les technologies en soi qui sont porteuses de contraintes, mais les assemblages matériels et logiciels spécifiques.

Pour Plimmer & Apperley (2002), les interfaces à base d'esquisses doivent répondre aux recommandations suivantes : elles doivent être basées sur l'utilisation directe d'un stylo, permettre d'éditer les esquisses d'une façon naturelle et simple et être idéalement accompagnées d'un système de reconnaissance textuelle pour éviter l'usage obligatoire du clavier. En outre, et c'est un point essentiel, elles doivent apporter une plus-value à la conception. Par essence, l'usage des esquisses numériques permet d'étendre la taille de la feuille de papier, de la sauvegarder et de la partager facilement.

Mais d'autres augmentations sont possibles. Différents paradigmes d'environnement d'esquisse numérique sont développés dans ce sens pour apporter une plus-value dans les premières phases de conception. Nous en distinguons deux types : les outils à usage individuel, visant à supporter la conception, et les outils à usage collectif, visant à supporter la collaboration. Pour chacune de ces catégories, sans rentrer dans un état de l'art exhaustif, nous nous proposons de décrire brièvement certains des prototypes les plus significatifs du domaine. Cela nous permettra de comprendre quels sont les avantages et les difficultés liés au développement de ces dispositifs, du point de vue de l'utilisabilité et de l'usage. Nous concluons alors sur les différentes tentatives d'évaluations, formelles ou informelles, de ces systèmes.

5.1. Outils à usage individuels

Ces environnements proposent de transposer dans un environnement informatique des outils traditionnellement utilisés en conception architecturale préliminaire : papiers, crayons, gommages, feutres, calques etc. Ces outils offrent plusieurs avantages. D'une part, ils permettent d'éviter un codage parfois fastidieux des esquisses, celles-ci étant directement intégrées dans le monde numérique et, d'autre part, ils permettent l'interprétation des esquisses, afin de nourrir des évaluateurs ou de permettre la modélisation 3D.

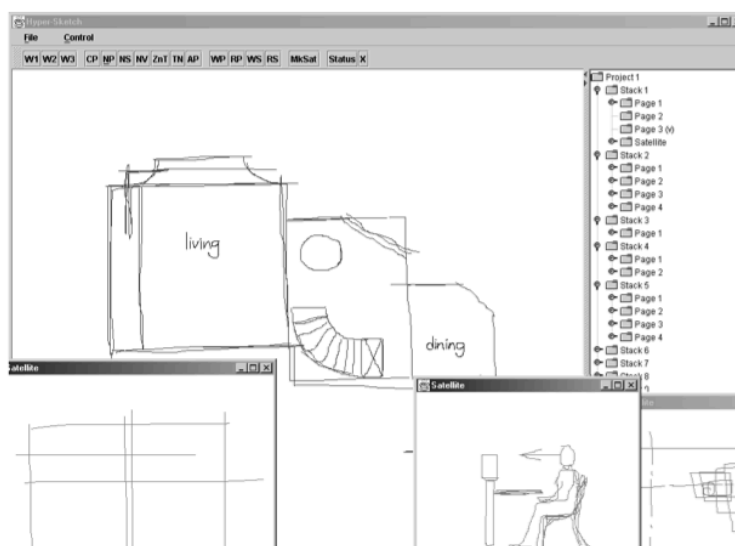


Figure 19

Capture d'écran du prototype Hypersketch II (tiré de McCall et al., 2001).

Un exemple simple de l'utilisation d'un environnement d'esquisses pour faciliter l'encodage est le prototype HyperSketch II (McCall *et al.*, 2001, figure 19). Ce système n'a pas de fonctions élaborées d'interprétation, mais permet une augmentation par rapport au papier réel. Il propose de collectionner une large série de dessins interreliés permettant de tracer le processus de conception. Ces dessins sont dessinés sur un espace numérique et accessibles sur différentes plateformes.

Hors du champ de l'architecture, mais dans le même ordre d'idées, de nombreux logiciels de graphisme tirent profit de l'interaction au stylo tout en intégrant l'esquisse au monde numérique, ce qui permet aisément son édition et son partage. Citons par exemple SketchBook Pro³⁵ d'Autodesk (figure 20).



Figure 20
SketchBook Pro (image promotionnelle du site web d'Autodesk).

Plusieurs outils tentent aussi de soutenir spécifiquement les activités de conception. Nous en abordons ici les principaux enjeux. Ces dispositifs sont de plusieurs types : les environnements matériels de bureaux virtuels à usage individuel, les logiciels d'interprétation de croquis en deux dimensions et les modélisateurs 3D sur base d'esquisses.

5.1.1. Dispositifs matériels

De nombreuses recherches visant à soutenir la conception par une approche au stylo sont inscrites dans le domaine de la réalité mixte et des interfaces tangibles. L'idée est de permettre aux utilisateurs d'interagir avec le monde numérique par l'intermédiaire d'objets courants, habituels ou proposant un design intuitif. Le stylo est un de ces outils d'interaction inscrit dans les habitudes des utilisateurs.

Citons ici trois exemples de dispositifs.

Le premier de ces systèmes de réalité mixte est probablement le digital Desk de Wellner (1994) qui est un exemple de bureau de réalité mixte. Il comprend une caméra et un système de projection au plafond. L'utilisateur peut utiliser du papier réel sur l'espace interactif. Ce papier est scanné et

³⁵ <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=6848332&siteID=123112>

reconnu par le système et peut être augmenté grâce au système de projection. L'interaction peut se faire avec un stylo électronique et avec les doigts.



Figure 21
Digital Desk de Wellner³⁶.

Plus récemment, Electronic Paper (Aliakseyeu *et al.* 2006) propose un environnement multimodal alliant geste, papier réel et virtuel, dessin et interfaces tangibles et pour supporter les activités de conception comme la manipulation et l'annotation d'images.

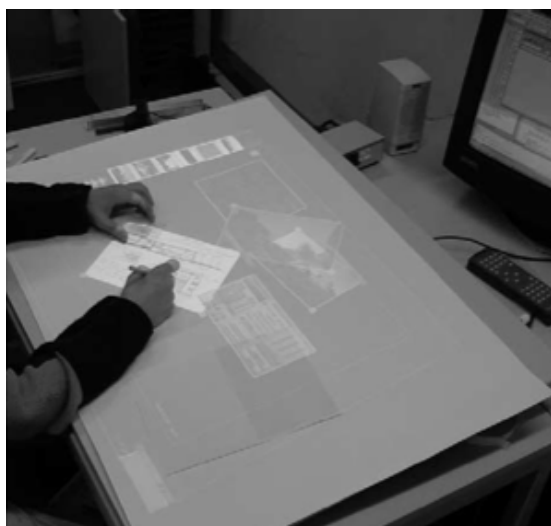


Figure 22
*Electronic Paper (Aliakseyeu *et al.* 2006).*

Un autre dispositif original et intéressant est le Hybrid Ideation Space (HIS) de Dorta (2008). Il s'agit d'un environnement d'immersion dans l'esquisse. Le dessin est tracé à main levée sur une tablette graphique, puis projeté en grandeur réelle, grâce à un projecteur sphérique, dans un

³⁶ Source : <http://rom-makita.fr/projet-master/les-ihm-plastiques/historique-et-emergence-plasticite-des-ihm/4-ubicomp-et-digital-desk-deux-concepts-revolutionnaires-1990/>

environnement entourant le concepteur. L'idée est de pouvoir, tout en dessinant, être immergé dans le dessin et le percevoir en taille réelle. Ce dispositif est principalement à destination de la conception d'objets et d'espaces intérieurs.



Figure 23

Hybrid Ideation Space (Source : site web Hybridlab³⁷).

Bien qu'il existe de nombreuses variantes de ces différents systèmes matériels, ils partagent le même objectif : reproduire l'environnement courant que constitue la table à dessin en y apportant des augmentations. Il n'y a actuellement pas de standard concernant ces dispositifs. Chaque laboratoire crée généralement son propre assemblage de technologies pour soutenir l'activité désirée. Les systèmes d'affichages et de capture sont divers. L'adjonction, en complément au stylo, de différentes modalités d'action (gestuelle, souris, clavier, etc.) est aussi variable. Il est dès lors difficile d'avoir une vision globale de l'utilisabilité de ces systèmes, chacun ayant ses propres critères concernant le confort d'utilisation. Au point de vue technique, les problématiques principales qui sous-tendent ces dispositifs sont la résolution de l'affichage et la précision de la calibration.

5.1.2. Interprétation de croquis

De nombreux projets de recherche visent l'interprétation de croquis flous, ambigus et incomplets, caractéristiques des premières étapes de la conception. Ces logiciels analysent puis interprètent les dessins à main levée pour créer un modèle informatique du projet.

Citons à titre d'exemple *the Electronic Cocktail Napkin* (Gross & Do, 1996), moteur de reconnaissance de diagrammes et de croquis simples, et son extension *Back of an Envelope* (Gross & Do, 2000) dont l'idée est de garder l'ambiguïté du dessin à main levée, notamment en gardant l'apparence du dessin brut, tout en rendant une série de services. Le système sert d'entrée, par l'interprétation des dessins, à différentes applications comme l'accès à une base de cas architecturaux, la création d'interfaces web ou la modélisation 3D. Il comprend une interface simple basée sur des commandes au stylo (la lettre alpha permet par exemple d'effacer la feuille), un système de calques virtuels semi-transparentes, une fonction d'« épuration » du dessin (en synthétisant les traits superposés), de l'import de documents préexistants et une interprétation du croquis.

³⁷ <http://www.hybridlab.umontreal.ca>

Oh *et al.* (2004) utilisent l'interprétation pour proposer un système de critique d'esquisses : le logiciel, Design Evaluator, interprète les esquisses et y applique un certain nombre de règles pré-encodées. Dans le cas de l'architecture, il pourra s'agir de la taille des pièces, de leur adjacence ou de leur regroupement. Le système renvoie des *feedbacks* textuels et visuels pour avertir l'utilisateur des options pertinentes ou défailtantes de sa conception préliminaire. Ce système nécessite cependant une base de connaissance du domaine ainsi que des règles propres au programme architectural en cours assez explicites, et requérant donc un encodage fastidieux. Le nombre de règles possibles est par ailleurs limité, et ne comprend que des relations spatiales entre les éléments du dessin.

Les applications d'interprétations de croquis sont particulièrement répandues dans le domaine du prototypage rapide d'interfaces logicielles (boutons, formulaires, agencement des zones de textes et des images, etc.) basé sur le dessin à main levée, avec des logiciels comme SILK (Landay & Myers 2001), SketchiXML (Coyette, Vanderdonck & Limbourg, 2006) ou Freeform de Plimmer & Apperley (2001, 2004). D'autres systèmes permettent encore d'interpréter des diagrammes UML. Les prototypes les plus récents (par exemple Dachselt, Frisch & Decker, 2008) utilisent la technologie Anoto afin de garantir plus de souplesse et d'ubiquité au système.

Citons aussi le prototype ICC du LUCID (Safin, Pecceu & Leclercq, 2008 ; Boulanger, Decortis, & Safin, 2005) qui vise à utiliser l'esquisse numérique en situation de mobilité pour l'activité de relevé de site en architecture. Le logiciel interprète des dessins à main levée et les remet au net automatiquement pour permettre de vérifier la cohérence des mesures et la complétude du relevé directement sur site.

Si de nombreux courants de recherche visent à interpréter les esquisses en architecture, en ingénierie mécanique, en conception de logiciels ou encore en design industriel, aucune de ces solutions, malgré leur utilité largement reconnue, n'est cependant sortie des laboratoires de recherche. Cela est dû, de notre point de vue, à deux difficultés majeures. D'une part, un levier technique : la complexité des interprétations fait que ces systèmes sont rarement stables ou fiables, ce qui ne permet généralement pas une diffusion commerciale. D'autre part, ces systèmes posent des questions fondamentales liées à l'interface et l'interaction homme-machine : quand reconnaître? Quoi reconnaître? Comment gérer les erreurs de reconnaissance? Ou encore comment réagir aux éléments reconnus?. Il s'agit donc de la question cruciale du retour d'interprétation et du dialogue avec les utilisateurs (Johnson *et al.* 2008). En effet, il apparaît que les esquisses peuvent difficilement être interprétées sans l'aide de l'utilisateur, car l'ambiguïté des croquis et leur incomplétude rendent les solutions potentielles multiples. Les systèmes intrusifs ou interruptifs ne sont généralement pas bien perçus car ils rompent le flux créatif des concepteurs, ce qui est contraire à la philosophie première de ces dispositifs. Mais l'interprétation nécessite un dialogue avec le concepteur pour sa supervision (Safin *et al.*, 2008). A l'heure actuelle, aucun consensus ou solution pertinente ne semble émerger des courants de recherche.

5.1.3. Modélisation 3D sur base d'esquisses

L'interaction avec les outils de modélisation 3D n'est généralement pas suffisamment fluide pour être exploitable de manière efficace en conception préliminaire, même si certains modeleurs tendent à être relativement simples. DDDoolz (de Vries et Achten 2002) par exemple est basé sur l'agencement de volumes simples (cubes) tandis que le modeleur commercial Sketchup associe des techniques de modélisation 3D et de dessin 2D³⁸. Plusieurs laboratoires ont néanmoins cherché d'autres modes d'interaction que la souris et le clavier, notamment en développant des systèmes proposant une alternative aux logiciels de modélisation 3D basée sur le dessin à main levée. C'est ce que l'on appelle le *Sketch-based interfaces for modeling* (SBIM).

³⁸ <http://sketchup.google.com>

Différents prototypes proposent de reconstruire des volumes 3D à partir de dessins d'architecture en perspective. Citons Digital Clay (Schweikardt & Gross, 2000), qui permet à l'utilisateur de tracer à main levée des perspectives simples (composées de lignes) et de corriger le modèle et l'interprétation à mesure que celle-ci s'effectue.

Svalabard (Huot, Dumas & Hégron, 2004) est un environnement qui vise à reproduire une interface habituelle de travail pour les concepteurs (multicalques, interface à stylo complétée d'autres périphériques). Le logiciel synthétise et interprète en temps réel une esquisse de perspective architecturale, dans le but d'alimenter la reconstruction de son modèle 3D. Dans ces travaux, la contribution principale est surtout de lever l'ambiguïté de l'esquisse en tentant de reconnaître et synthétiser les traits.

Sketchpad+ (Piccolotto, 1998) est un système complet, utilisant un bureau virtuel, de modélisation 3D au stylo. Il permet le dessin 2D sur des calques manipulables dans un espace 3D. La combinaison des dessins sous plusieurs perspectives permet de créer des faces et des objets. Il ne s'agit donc pas de dessiner en perspective sur une unique projection, mais en plans multiples autour de l'objet. Il est aussi possible d'importer des formes préétablies, de dessiner dessus et d'effectuer des opérations booléennes. Le système permet différents types de rendus des modèles 3D ainsi créés. Enfin, il propose des fonctionnalités minimales de collaboration à distance.

Olsen *et al.* (2009) identifient plus de trente prototypes de recherche développés depuis les années 90 qu'ils classent en trois catégories : les outils visant à créer un modèle 3D, à ajouter des détails à un modèle préexistant ou à déformer un modèle préétabli. Dans tous les cas, les étapes à réaliser par les logiciels sont l'acquisition de l'esquisse (avec une grande disparité de technologies matérielles, voir plus haut), sa synthèse et son interprétation (qui pose le même genre de difficultés que pour la catégorie précédente).

Ces systèmes posent de nombreuses difficultés techniques, notamment pour transférer l'information ambiguë contenue dans une esquisse en deux dimensions en une information géométrique complète et univoque en trois dimensions. La précision du modèle et sa qualité intrinsèque sont aussi des défis techniques majeurs.

Les systèmes posent aussi des problématiques d'interface (Olsen *et al.*, 2009) : pour garder le caractère spontané des esquisses, nécessaire aux concepteurs, les interfaces doivent être aussi épurées que possible, alors que les manipulations et éditions de modèles 3D et la supervision de la reconnaissance et de la reconstruction nécessitent de nombreuses fonctionnalités parfois fastidieuses. L'utilisation de modalités gestuelles en complément au stylo est une option parfois usitée.

5.2. Les outils de collaboration

Plus récemment, de nombreux projets de recherche et développement concernent les outils de collaboration supportant le dessin à main levée. Parmi ceux-ci, on peut relever trois catégories : les espaces de réunions numériques en présence, les outils d'annotation de documents à distance, généralement asynchrone, et les outils de dessin collaboratif synchrone à distance.

5.2.1. Espaces de réunion

L'utilisation de technologies numériques pour soutenir le travail collaboratif localisé est l'objet de nombreuses recherches et de développements commerciaux. Parmi ceux-ci, plusieurs tentent de proposer des environnements sur base de tables numériques. Il s'agit de pouvoir proposer une métaphore de la table de réunion à plusieurs utilisateurs situés au même endroit.

De nombreux dispositifs existent pour ce faire (pour une revue, voir Scott, Grant, & Mandryk, 2003). Parmi les plus récents, citons le dispositif Surface de Microsoft ou la DiamondTouch Table. Ces technologies à large visée proposent cependant des interfaces tactiles et n'incluent pas le stylo numérique.

Un des dispositifs les plus avancés et récents basé sur l'esquisse numérique est celui de Haller *et al.* (2006). Le système combine une table interactive (technologie Anoto et système de projection par le plafond) et une projection murale. Les utilisateurs peuvent connecter leur propre ordinateur au système par Bluetooth, afin de permettre l'échange de fichiers. Ils proposent aussi l'utilisation du papier réel, qui est localisé et peut être augmenté par projection. Les informations affichées dans les espaces personnels de chacun ou sur la table peuvent être projetées sur la surface murale.

Koutamanis (2005) propose un dispositif simplifié pour favoriser la collaboration synchrone et en présence : l'utilisation de plusieurs stylos Anoto, qui permettent aux participants d'annoter des copies de documents réels et de rassembler les annotations sur un unique document numérique.

A noter que le Hybrid Ideation Space (Dorta, 2008) permet aussi l'implication de plusieurs utilisateurs dans le système immersif, permettant aux utilisateurs de tenir des réunions immergés dans l'esquisse à l'échelle 1:1.

De nouveau, il existe une grande variabilité de ces dispositifs. Néanmoins, les enjeux de ces environnements collectifs sont mieux connus que leur pendant individuel. Scott *et al.* (2003) proposent ainsi différentes recommandations pour les systèmes de collaboration autour d'une table numérique : ces systèmes doivent soutenir l'interaction interpersonnelle, offrir un accès partagé aux différents objets physiques et numériques, privilégier l'utilisation d'objets physiques, permettre l'action simultanée des différents utilisateurs et proposer une disposition optimale des usagers. Ils doivent proposer une transition fluide entre les différentes activités collaboratives, entre le travail individuel et groupal et entre les activités sur la table et en dehors.

5.2.2. Annotation de documents

Dans ces logiciels, l'idée est de positionner une information sur un modèle ou un document en vue de sa lecture par un partenaire. Il s'agit de permettre l'annotation collaborative d'objets.

Par exemple, le prototype SWHIFT de l'équipe G-SCOP de Grenoble (Prudhomme, Marin & Masclet, 2010) permet de positionner des hiérarchies complexes d'annotations et de tracer le processus argumentaire de la conception. Les annotations possèdent ici un caractère très structuré. Ce système fonctionne cependant par interface clavier-souris, ce qui est d'ailleurs plus commode pour permettre des annotations « claires », bien que l'équipe réfléchit, en collaboration avec le LUCID, à la possible utilisation du stylo électronique pour leur système.

Un autre genre de dispositif existe, utilisant le stylo numérique pour annoter des documents 3D. Citons le Space Pen (Jung, Gross & Do, 2002), qui permet de manipuler un modèle 3D et de l'annoter de manière collaborative au stylo électronique, soit via l'adjonction de notes, soit en dessinant directement sur le modèle. Ce système est cependant asynchrone.

Les réflexions pour la conception de ces systèmes portent sur la manipulation des informations et sur les modalités d'annotation, qui sont souvent plus structurées que le simple dessin à main levée. La particularité de ces outils est qu'ils ne permettent pas de partir d'une « feuille blanche », mais de modifier un modèle. En ce sens, nous ne les envisageons pas sur le même pied que les dispositifs de dessin collaboratif.

5.2.3. Dessin collaboratif à distance

Cette catégorie d'outils de collaboration vise à tirer toutes les potentialités des interfaces à stylo pour supporter des activités de dessin collaboratif. Récemment, et notamment avec la généralisation d'Internet, de très nombreux systèmes sont développés pour le dessin en collaboration distante synchrone, notamment différentes solutions commerciales.

Citons par exemple parmi beaucoup d'autres : Scriblink³⁹, Imagination Cubed⁴⁰, Sketchfu⁴¹ ou encore WhiteBoardMeeting pour Skype⁴².

Généralement les fonctions graphiques proposées par ces logiciels sont des services annexes à des systèmes de clavardage, audio- ou visio-conférences. Ils possèdent un certain nombre de limitations (Leclercq & Detheux, 2009) :

- ils n'autorisent actuellement pas la gestion de plusieurs documents superposés, préalable indispensable au travail de conception architecturale ;
- la surface de travail est généralement limitée à un écran d'ordinateur courant, ces logiciels n'étant pas intégrés dans des environnements spécifiques ;
- ils ne permettent pas l'import de documents pré-établis ;
- le dessin ne se fait pas toujours à main levée ;
- le dessin collaboratif est généralement asynchrone : le trait n'apparaît sur le poste distant que lorsqu'il est terminé.

Dès lors, plusieurs prototypes de recherche ont été développés afin de permettre le dessin collaboratif à distance.

TeamWorkStation, suivi des différents prototypes de ClearBoard (Ishii, Kobayashi & Grudin, 1993) sont parmi les premiers prototypes aboutis permettant le dessin collaboratif à distance. Le Système ClearBoard utilise la métaphore d'une vitre transparente séparant deux collaborateurs, sur laquelle ils peuvent écrire et au travers de laquelle il peuvent se voir. Ainsi, il s'agit d'un espace de travail vertical sur lequel le dessin peut être effectué, et au travers duquel l'image du partenaire

³⁹ <http://www.scriblink.com/>

⁴⁰ <http://www.imagination3.com/>

⁴¹ <http://sketchfu.com/>

⁴² <http://www.idroo.com/>

distant est projetée. Ce système a pour objectif de favoriser la fusion entre l'espace de travail et l'espace interpersonnel. Leur idée est de favoriser notamment le croisement du regard.

Certains logiciels, à des fins de recherche, sont détournés pour créer des interfaces collaboratives. C'est ainsi que Tang, Lee & Gero (2010), utilisent un logiciel de dessin, SketchBook Pro combiné à une fonction de partage d'écran Windows. L'environnement ainsi conçu est une palette de dessin strictement partagée.

Enfin, notons que le HIS de Dorta à Montréal est actuellement développé dans une version collaborative distante (Dorta, Kalay, Pérez, & Lesage, 2011).

5.3. Evaluations de ces systèmes

Bien que ces dispositifs soient le plus souvent basés sur une compréhension fine du domaine, des enjeux de la conception préliminaire et de l'utilité de l'esquisse, peu d'études systématiques ou approfondies ont été menées sur les spécificités de l'esquisse numérique (Aliakseyeu *et al.*, 2006). La plupart des études d'usage rapportées sont effectuées sur un mode informel et/ou portent sur des critères très précis (temps d'exécution, erreurs, nombre d'idées émises, etc.).

Par exemple, sur une courte étude, Plimmer & Apperley (2004) ont montré que l'utilisation d'un environnement d'esquisses pour le design d'interfaces encourageait l'émission d'un plus grand nombre d'idées, tout en étant plus rapide qu'un environnement traditionnel. Le prototype Electronic Paper d'Aliakseyeu *et al.*, (2006) est basé sur une connaissance empirique approfondie du domaine. L'aspect intuitif est leur recommandation principale. En testant le système dans des situations de conception relativement écologiques, les retours d'utilisateurs sont mitigés entre ceux souhaitant étendre les fonctionnalités et ceux voulant réduire la complexité. L'enjeu de bons environnements d'aide à la conception se situe de notre point de vue dans cette balance entre la simplicité et les potentialités.

D'une manière générale, les évaluations formelles ou informelles des systèmes d'esquisses numériques mettent en avant la liberté d'action et la non restriction de l'ambiguïté et de la créativité. Mais elles mettent cependant aussi en avant certaines difficultés d'ordre technique : bugs, ralentissements ou arrêts inopinés des systèmes sont généralement fréquents, bien que relatés de manière anecdotique dans la littérature. Les dispositifs d'esquisse numérique rendent difficile le tracé des dessins « artistiques », notamment à cause des faiblesses dans la prise en compte de l'inclinaison et la pression du stylo (Koutamanis, 2005). Ces dispositifs nécessitent souvent de passer par plusieurs « modes » d'interaction (dessin, manipulation, visualisation de l'interprétation, etc.) ce qui peut interrompre l'activité et gêner les utilisateurs (Plimmer, tang & Young, 2006)

D'autres tests ont évalué spécifiquement l'utilisabilité de ces systèmes pour plusieurs tâches.

Les tests structurés de Aliakseyeu *et al.*, (2006) sur l'environnement Electronic Paper ont montré que les tâches de positionnement de feuillets virtuels étaient effectuées moins rapidement dans leur environnement que sur papier réel. Par contre, ils ne constatent pas de différence en ce qui concerne l'activité de dessin. Leur système permet donc de dessiner de manière aussi rapide que le papier-crayon.

Elliot & Hearst (2002) ont effectué une comparaison systématique d'une table numérique de grande taille, d'une tablette à stylo et d'un ordinateur à souris pour des tâches de tri d'images et de traçage de dessins. Il apparaît sans surprise que la table et la tablette sont préférées à l'ordinateur pour des tâches de dessin, mais que ces environnements sont équivalents en termes de préférences. Pour le tri d'images, le dispositif le plus efficace est la souris, suivie de la tablette puis de la table, sur laquelle de nombreuses erreurs surgissent et les temps d'exécution s'allongent. L'étude montre aussi que les problèmes de calibration sont cruciaux pour une expérience optimale d'utilisation. Enfin, elle met en évidence une qualité supérieure du croquis sur la tablette, probablement due à la calibration plus stable et à la taille réduite.

Enfin, peu d'études formelles sur l'impact cognitif de l'esquisse numérique ont été mises en place. Néanmoins, nous pouvons citer les suivantes.

Lim (2003) effectue une analyse comparative de protocoles d'un architecte professionnel entre l'usage de l'esquisse papier et de l'esquisse numérique, outillée par le prototype Electronic Cocktail Napkin (Gross & Do, 1996), qui interprète les esquisses et renvoie un modèle 3D au concepteur. Ses résultats montrent que si la durée du dessin est relativement similaire dans les deux activités, l'utilisation des fonctionnalités de réalité virtuelle du logiciel allonge globalement la durée de l'activité. Ils montrent surtout l'impact structurant de la présence du modèle 3D sur les différents niveaux d'abstraction des dessins. L'utilisation de l'environnement d'esquisse numérique implique une structure plus aléatoire des mouvements abstraits-concrets alors que le protocole papier-crayon est caractérisé par des mouvements réguliers. La conception à l'aide du logiciel implique aussi une proportion de travail plus importante sur des bas niveaux d'abstraction, notamment par l'intermédiaire des modèles 3D fournis par l'interprétation.

Les tests de l'Hybrid Ideation Space (Dorta, 2008) ont montré que le système, en comparaison avec des outils de prototypage physiques ou numériques, encourageait la créativité (Design Flow) et réduisait la charge de travail perçue.

Tang *et al.* (2010) comparent l'activité de conception collaborative en présence sur papier-crayon, et à distance en utilisant un logiciel de dessin (SketchBook Pro) partagé. L'analyse des protocoles des paires d'étudiants montre que les activités sont relativement similaires, tant du point de vue des activités cognitives mobilisées, que du contenu et de la précision des dessins et que de la qualité du résultat. Les auteurs notent cependant que le dispositif utilisé permet une grande finesse et une variété dans les traits, se rapprochant des possibilités très étendues qu'offrent le papier et les crayons (taille des traits, couleurs, types de feutres ou crayons, prise en compte de l'inclinaison et de la pression du stylo, etc.). Les esquisses créées sur environnement numérique et sur papier crayon sont très difficiles voir impossibles à distinguer, ce qui est rarement le cas avec les autres types de logiciels. Ils suggèrent que ces caractéristiques purement graphiques sont peut-être explicatives de cette absence de différence.

5.4. Enjeux

Cet état de l'art montre un panel des systèmes interactifs à base d'esquisse. Nous avons tenté d'identifier les plus significatifs, dans l'étendue des systèmes disponibles. Pour une revue plus approfondie, le lecteur intéressé pourra se référer à Johnson *et al.* (2008) ou à Olsen *et al.* (2009)

Il est tout d'abord surprenant de constater que, malgré de nombreuses recherches sur le sujet et une variété de prototypes, ces dispositifs sont peu répandus en dehors des communautés de

chercheurs. Les technologies matérielles et logicielles ne semblent pas assez matures pour pouvoir intégrer les agences professionnelles des métiers de la conception.

Les interfaces à base d'esquisse numérique posent des défis de plusieurs ordres à la communauté scientifique : des problématiques de *hardware*, de reconnaissance d'esquisse, d'interaction homme-machine, et de compréhension des usages des esquisses traditionnelles (Johnson *et al.*, 2008). Notre approche de recherche se situe dans les deux dernières questions.

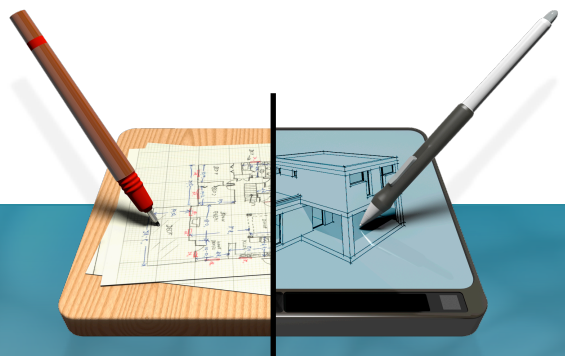
En termes d'interaction homme-machine, de nombreuses questions se posent sur la pertinence du stylo comme moyen d'interagir avec le monde numérique, sur la complémentarité de cet interacteur avec d'autres dispositifs, sur la constitution d'interfaces « naturelles ». Des recommandations doivent être spécifiquement développées par la communauté scientifique.

Mais au-delà de ces considérations liées à l'interaction, il est aussi nécessaire de comprendre en profondeur les utilisations des esquisses papier et des esquisses numériques pour proposer des potentialités réellement pertinentes aux utilisateurs. Alors que l'impact cognitif de l'interaction avec un croquis virtuel est encore largement méconnu, il apparaît nécessaire de l'étudier en profondeur pour alimenter la base de connaissances scientifiques essentielles aux développements d'outils de future génération à la fois innovants et suffisamment pertinents que pour pouvoir sortir des laboratoires.

Tels sont les défis que l'équipe du LUCID a tenté de relever et pour lesquels nous visons dans ce travail à apporter une dimension empirique d'étude d'usages.

CHAPITRE 3

Questions de recherche



1. Contexte : outils d'esquisse numérique développés au LUCID

Fort d'une longue expérience dans le domaine de la conception et de l'interaction homme-machine, le laboratoire LUCID de l'Université de Liège a développé plusieurs prototypes logiciels de soutien à la conception individuelle et collaborative, sur base d'esquisses. Notre travail de recherche s'est inscrit dans le cadre du développement de ces outils, et à notamment pour ambition de le nourrir.

Dans cette section, nous décrivons les trois prototypes que nous avons utilisés pour répondre aux questions que soulève l'assistance à la conception architecturale sur base d'esquisses numériques.

- Le Bureau Virtuel de Conception (BV) est l'environnement matériel utilisé dans nos études. Il est composé d'un système de projection, d'une table et d'un stylo électronique. Son objectif est de fournir un confort d'utilisation et de dessin numérique proche d'une table à dessin traditionnelle (et, dans sa version collaborative, d'une table de réunion).
- EsQUIsE est un logiciel d'aide à la conception architecturale préliminaire, à usage individuel. Ce prototype interprète les esquisses dessinées sur le BV et construit en temps réel un modèle du bâtiment en cours de conception. Ce modèle alimente des évaluateurs qui fournissent un *feedback* aux utilisateurs pendant qu'ils dessinent.
- SketSha est un logiciel à usage collectif de partage de croquis à distance, supportant la communication synchrone sur un mode graphique. Le logiciel permet l'import de documents préexistants et le partage en temps réel et à distance de dessins et d'annotations numériques à main levée. Accompagné d'un dispositif de visioconférence, il fournit un environnement multimodal de collaboration à distance (verbal, visuel et graphique).

L'idée de base du développement de ces systèmes est de garder les avantages clairement identifiés du papier et du crayon (souplesse et immédiateté dans l'interaction, liberté dans l'expression, ambiguïté du dessin, etc., voir 3.3.4 du chapitre 2) tout en profitant de la force de calcul des outils informatiques, permettant de fournir des *feedbacks* au concepteur individuel dans le cas d'EsQUIsE ou de proposer une modalité de communication supplémentaire à distance dans le cas de SketSha.

Dans un premier temps, nous explicitons la philosophie générale qui sous-tend le développement de ces systèmes. Ensuite, nous décrivons en détail ces trois prototypes. Enfin, nous synthétisons les augmentations apportées par ces dispositifs, et leurs effets attendus sur l'activité de conception.

1.1. Philosophie des dispositifs

1.1.1. L'ordinateur invisible

Ces trois dispositifs se basent sur le paradigme de l'« ordinateur invisible » (Norman, 1998). L'idée de ce paradigme est que la technologie moderne puisse soutenir des activités sans provoquer d'interruption et sans que de nouvelles tâches viennent « parasiter » l'activité. L'outil doit s'effacer de la conscience de ses utilisateurs.

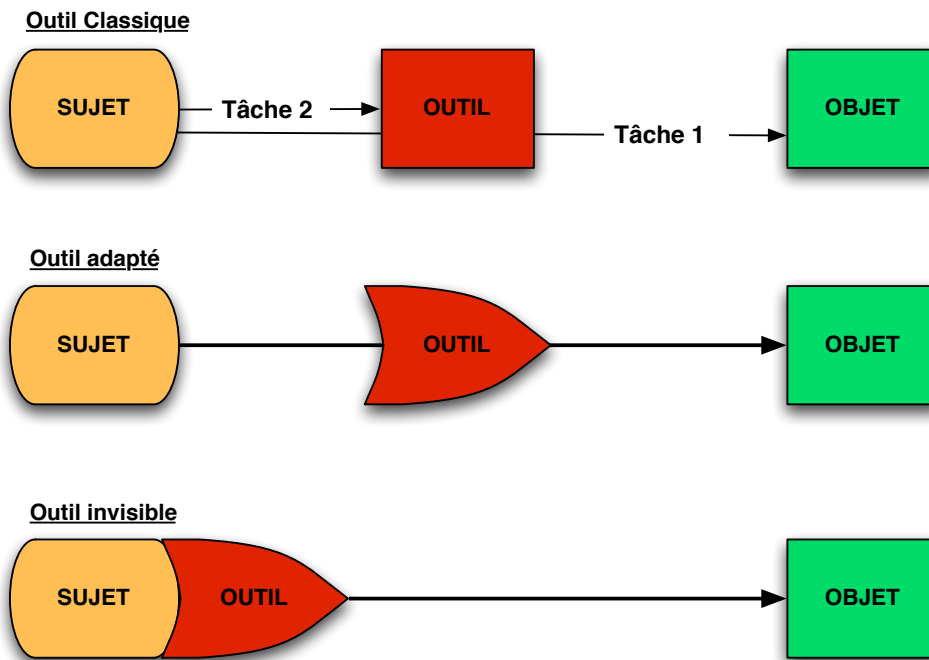


Figure 24
Métaphore de l'ordinateur invisible.

La plupart des outils qui permettent des activités plus ou moins complexes (et notamment des activités créatives ou de conception) engendrent, lors de leur utilisation, deux sous-tâches à effectuer conjointement (figure 24, haut) : la tâche-cible d'une part, dirigée vers l'objet de l'activité (tâche 1), ainsi que, d'autre part, une tâche annexe dirigée vers la gestion de l'outil (tâche 2). Cette double contrainte peut provoquer des perturbations de l'activité et une surcharge de travail.

L'exemple du traitement de texte est assez éloquent à ce propos. Nous avons tous déjà été confrontés, lors d'une tâche de rédaction avec un logiciel de traitement de texte, à une frustration émanant de la coexistence de deux sous-tâches interférant l'une avec l'autre. La première, l'objet de l'activité, est évidemment la rédaction du texte à proprement parler. Cette tâche constitue, ou devrait constituer, l'essentiel de l'activité. Cependant, lors de la rédaction, de nombreuses interruptions par le logiciel (corrections automatiques, mises en forme de puces et de numéros, changements inopinés de police de caractère, etc.) impliquent de se détourner de la tâche principale et de s'engager dans une seconde tâche de gestion de l'environnement numérique : repérer et corriger les erreurs de mise en page automatique, veiller à la cohérence des styles, etc. Outre ces interruptions, il est aussi souvent nécessaire d'être vigilant, en sauvegardant régulièrement le document, en veillant à une utilisation la plus propre possible des styles, etc. Selon nous, toutes ces activités constituent des activités « parasites » : elles ne sont pas nécessaires à l'accomplissement de la tâche première et peuvent même en perturber le déroulement. Lors de la rédaction d'un texte, ces différentes tâches annexes peuvent interrompre le flux de la pensée et avoir une incidence sur la qualité du texte.

D'autres outils, que nous qualifions d'« adaptés » (figure 24, milieu), sont moins contraignants quant à leur usage. Ils ne créent pas nécessairement d'interruptions inopinées mais sont tout de même présents dans l'esprit de l'utilisateur. Ces outils lui permettent de se centrer sur la tâche sans être perturbé et de reléguer la gestion de l'outil à des moments spécifiques.

Par exemple, l'appareil photo argentique implique de devoir gérer l'objet en même temps que l'image qu'il cherche à capturer : le point de vue dans le viseur est légèrement décalé, ce qui empêche la correspondance précise entre l'image perçue et l'image photographiée. Le focus et le flash sont parfois manuels, ce qui implique une manipulation précise de l'appareil avant la prise de vue. Néanmoins, quelques schèmes d'action suffisent à gérer ces difficultés et l'appareil est globalement bien adapté à la tâche qu'il soutient. L'appareil doit également être manipulé de manière spécifique : positionnement de l'objectif, retrait des caches, etc. Ceci crée des tâches annexes, mais clairement dissociées de la tâche principale de prise de photos.

En outre, les appareils photos plus récents, et principalement sur les smartphones, sont, de ce point de vue, de plus en plus aisés à utiliser, même si la qualité des photos est moindre. Il y a une correspondance stricte entre l'image perçue dans l'écran et celle capturée, et le focus et le flash sont souvent automatiques. L'utilisation de ces appareils et l'exploitation des prises de vue sont quasi-immédiates. C'est ainsi que l'on constate une explosion de la prise de photos et de vidéos dans la vie quotidienne.

L'informatique devient « invisible » lorsqu'elle disparaît de la conscience de l'utilisateur (figure 24, bas). La manipulation d'un tel outil n'implique pas une tâche en soi pour l'utilisateur et libère ainsi des ressources pour l'exécution de la tâche principale. La conscience de la tâche à réaliser prédomine sur celle de l'utilisation de l'outil. L'outil devient en quelque sorte le prolongement de la tâche ou du corps.

Un exemple d'interface invisible est facilement identifiable dans le domaine de la conduite automobile. En effet, la voiture est conçue pour permettre à l'utilisateur, après entraînement, de concentrer son attention sur la route et sur la tâche de conduite à proprement parler. Ainsi, un conducteur est engagé dans des activités de conduite, d'analyse du trafic ou de planification d'itinéraires, mais pas nécessairement dans l'utilisation de l'objet-voiture, qui disparaît de la conscience. Certains indices comportementaux trahissent cette disparition. A titre d'exemple, on entendra plutôt le conducteur dire « je tourne à droite » et non « je tourne le volant vers la droite » ou « je tourne la voiture à droite », ce qui dénote d'un certain effacement de l'objet de sa conscience. En effet, c'est bien le volant que l'utilisateur tourne, mais ce dernier a la sensation qu'il effectue une action avec son propre corps. Cette invisibilité est atteinte par plusieurs caractéristiques du dispositif :

l'analogie des commandes : pour tourner à droite, il faut effectuer un mouvement vers la droite ;

la standardisation des dispositifs : toutes les voitures, à quelques détails près, fonctionnent sur le même principe et le code de la route est harmonisé. A ce titre, conduire en Angleterre par exemple, implique un effort conséquent d'habituation et fait resurgir la présence du dispositif dans la pensée de l'utilisateur ;

les feedbacks immédiats : toute action sur la voiture a un résultat direct et identifiable ;

le contrôle absolu : la voiture n'effectue pas d'action sans une action de l'utilisateur ;

l'invisibilité du modèle technologique sous-jacent : l'utilisateur moyen n'a pas besoin de connaître les réalités mécaniques du moteur pour pouvoir utiliser correctement un véhicule.

Le caractère invisible d'une interface tient à sa disparition de la conscience des utilisateurs. Cette disparition s'obtient par une combinaison de deux composantes, l'une matérielle et l'autre d'usage.

- Un bon design. La notion d'invisibilité peut être considérée comme un paradigme particulier d'interaction, mais elle est néanmoins le fruit de bonnes pratiques d'ergonomie, maîtrisées depuis un certain temps déjà. Ainsi, les différentes propriétés évoquées ci-dessus sont des critères ergonomiques reconnus en ergonomie des interfaces (voir Bastien et Scapin, 1993). Ce bon design doit aussi se baser sur une compréhension fine de l'activité de l'utilisateur final.
- Une appropriation par l'utilisateur. Cette appropriation est à mettre en relation avec les niveaux de contrôle de l'action (Reason, 1993 ; Rasmussen, 1990). Ainsi, cette disparition peut être effective si le niveau de contrôle est très bas, c'est-à-dire si l'utilisation du logiciel peut se baser sur des automatismes, c'est-à-dire des schèmes d'action construits, appropriés et intériorisés par l'utilisateur (Rabardel, 1995). Le niveau de contrôle dépend aussi du contexte d'utilisation. Ainsi, en situation inhabituelle ou de crise, il peut être relevé, afin que l'action ne s'effectue plus par l'utilisation d'automatismes, mais par la mobilisation de règles ou de connaissances.

Ainsi, pour concevoir des dispositifs « invisibles », il est nécessaire selon nous d'adopter une perspective anthropocentrée : c'est par la compréhension approfondie des modes d'action, des automatismes et des stratégies d'utilisateurs en situation que l'on peut définir des concepts et développer des produits fortement couplés à ces activités.

A noter que l'invisibilité de l'informatique n'est évidemment pas un objectif absolu. Elle dépendra de l'expertise, des habitudes et des buts de l'utilisateur. Ainsi, un photographe professionnel préférera certainement gérer lui-même le focus et le flash de son appareil, et appréciera peut-être plus le rendu d'un appareil argentique ; un pilote de formule 1 sera sans doute concentré à la fois sur sa tâche de conduite et à la fois sur la gestion des performances de son bolide ; et, bien entendu, les possibilités et fonctionnalités offertes par les outils de traitement de texte compensent très largement les problèmes qu'ils induisent. Nous avons par exemple montré que, dans le cadre de la conception d'un système d'aide au relevé de terrain en architecture, une interface invisible n'est pas nécessaire : l'activité de relevé est par essence une succession de prises de mesures et de notes ; et l'interruption de ces activités par un logiciel n'est pas problématique, si toutefois ces interruptions sont bien pensées (Safin, Pecceu & Leclercq, 2007).

1.1.2. Objectifs des logiciels

Le développement des trois dispositifs d'esquisse numérique du LUCID se base sur ce paradigme de l'ordinateur invisible. L'interface à stylo électronique est conçue pour se rapprocher au mieux d'un stylo traditionnel, outil « naturel » et parfaitement maîtrisé par les architectes. En se reposant sur cette maîtrise, c'est-à-dire sur l'usage de schèmes d'action et d'automatismes intériorisés par les utilisateurs, l'objectif est d'offrir des environnements dont l'utilisation est au maximum simplifiée. Le stylo électronique ne doit pas créer de contraintes supplémentaires pour le concepteur et la présence du traitement informatique des esquisses doit être « invisible ». A cet effet, les environnements de dessin numérique ont été développés en respectant les spécifications générales suivantes (Safin, Delfosse & Leclercq, 2010).

- Tenter de reproduire fidèlement un environnement classique de conception papier-crayon, en se basant sur les habitudes des utilisateurs.
- Fournir une surface de travail importante, en vue de respecter deux métaphores : la table à dessin pour une utilisation individuelle et la table de réunion dans une utilisation collective.
- Fournir une interaction au stylo. Chez les architectes et designers, habitués à dessiner, l'usage d'un stylo peut être considéré comme un outil naturel. Les autres professionnels de la conception, comme les ingénieurs mécaniciens, moins familiers du stylo comme instrument de simulation, sont néanmoins habitués aux annotations papier-crayon pour mener des réunions (Boujut & Blanco, 2003).

- Utiliser des feuilles de papier augmentées qui imitent le papier traditionnel (en l'occurrence des calques semi-transparents) tout en fournissant des capacités supplémentaires : dimensions plus importantes, possibilité de zoom, transparence paramétrable, etc.
- Autoriser des interactions usuelles, notamment en permettant l'utilisation d'autres outils traditionnels de dessin (règle, équerre).
- Permettre une compatibilité avec du papier réel et d'autres modes de représentation, via notamment des fonctions d'import simplifiées.
- Permettre un degré suffisant de résolution du dessin.

La philosophie du LUCID a donc toujours été en priorité de garder la facilité d'usage du stylo et, dans un second temps, d'identifier et d'implémenter des augmentations numériques, en vue de soutenir l'activité de conception.

Outre ces éléments relatifs à la facilité d'utilisation du système, l'objectif est de soutenir deux activités cruciales de la conception architecturale. La conception créative d'une part, et la revue de projet collaborative à distance d'autre part.

Pour la conception créative, le parti pris par le LUCID est d'offrir aux concepteurs des représentations alternatives de l'objet architectural en cours de création. Dans ce but, le logiciel EsQUIsE interprète les croquis architecturaux et affiche en temps réel un modèle 3D du bâtiment. Cette représentation externe a pour ambition d'aider le concepteur à changer son point de vue sur l'objet afin de faciliter la génération de solutions, le raisonnement analogique et l'évaluation de solutions (voir chapitre 2, section 2).

Pour la conception collaborative, l'enjeu est de soutenir les réunions de travail synchrones mais distantes. L'esquisse numérique est ici utilisée comme modalité supplémentaire de communication à distance. L'essentiel des outils d'échanges actuellement disponibles pour les architectes sont soit limités à des échanges asynchrones (mails et serveurs de documents par exemple), soit très pauvres au niveau de l'interaction. En effet, le téléphone et la visioconférence ne permettent que l'échange par le canal verbal et un canal visuel limité. Par la création d'un environnement permettant de dessiner, de manipuler et d'annoter des documents au stylo, l'objectif est de fournir aux concepteurs un moyen de soutenir des versions « fortes » de la collaboration, c'est-à-dire de la co-conception (voir chapitre 2, point 4.2).

Ci dessous, nous décrivons chacun des dispositifs, puis concluons sur les différentes augmentations qu'ils tentent d'apporter aux activités pour lesquelles ils ont été conçus.

1.2. Description des dispositifs

1.2.1. Le Bureau Virtuel

Le Bureau Virtuel (BV) est le dispositif matériel sur lequel tournent les deux logiciels⁴³. L'objectif qui a mené à son développement était de disposer d'un environnement de travail d'une taille comparable à celle d'une table à dessin, comprenant une surface de dessin d'une résolution de

⁴³ A noter que les logiciels peuvent tourner sur d'autres plates-formes comme des tablettes-écrans ou des tablettes graphiques.

l'ordre de 4 points par millimètre carré⁴⁴. Ce dispositif est un assemblage original d'une table digitale de format A0 s'apparentant à une table à dessin traditionnelle et d'un système de projecteurs et miroirs installés dans un plafond suspendu. L'interaction s'effectue à l'aide d'un stylo électronique qui, par son poids et sa forme, se rapproche d'un stylo classique (figure 25).

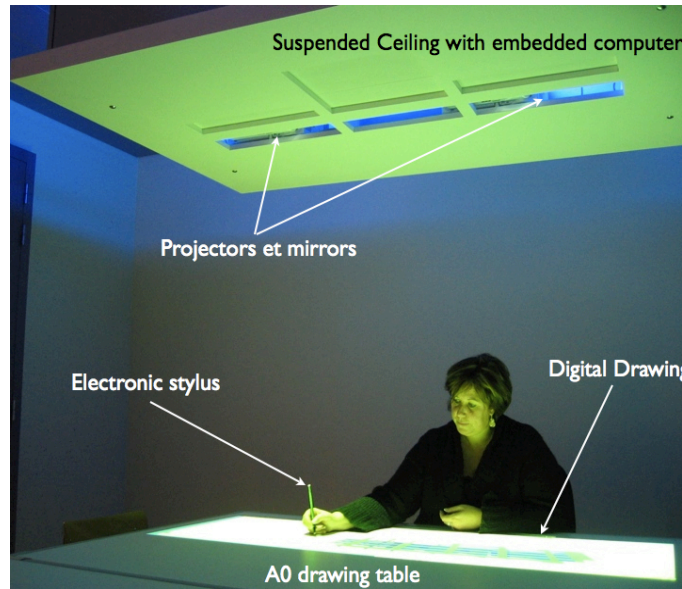


Figure 25
Le Bureau Virtuel.

Plusieurs versions du Bureau Virtuel ont été développées avec des choix technologiques importants (système de projection, type de table et type de stylo), afin de garantir l'utilisabilité du système (pour plus de détails, voir Safin, Boulanger & Leclercq, 2005a, 2005b). Nous listons ici ses principales caractéristiques et les raisons qui ont poussé à leur implémentation.

- L'affichage s'opère par un système de projection par le plafond. Ce système pose quelques problèmes d'ombre mais s'avère bien plus efficace qu'une projection par le dessous de la table, car l'encombrement au niveau des jambes empêcherait l'installation confortable de l'utilisateur, critique en cas d'utilisation prolongée. La dernière version de l'environnement comprend un système de projection avec un seul projecteur haute définition (contrairement aux versions précédentes qui comportaient deux projecteurs de moindre résolution). La projection sur la table se fait via un miroir métallique sans verre, évitant ainsi la diffraction des rayons lumineux due aux changements air/verre/air. Afin d'éviter les excès d'ombres liés à une projection par le plafond, projecteur et miroir ont été placés de telle manière que la projection est inclinée, sans que l'utilisateur ne rentre dans la pyramide de projection (figure 26).
- La table est une *whiteboard*⁴⁵ à trame électronique positionnée de manière horizontale. Ce système s'avère plus approprié que l'utilisation d'un plan de travail incliné car l'activité de conception mobilise généralement de nombreux documents de tailles et natures différentes, lesquels sont difficiles à manipuler sur une table inclinée. La table n'induit pas de contraintes

⁴⁴ Cette résolution est ce qui se fait de mieux compte tenu des technologies de projection et de table électronique. Elle n'est cependant pas optimale au regard des possibilités de dessin. Le stylo électronique sur cet environnement ne peut avoir la finesse d'un feutre ou d'un crayon bien taillé. En comparaison, un écran d'ordinateur d'une résolution courante de 72 dpi permet un affichage de l'ordre de 8 points par millimètre carré.

⁴⁵ A l'origine, ce système est conçu pour être accroché verticalement aux murs et être utilisé comme tableau. Ici, il est positionné horizontalement sur une armature de table classique.

particulières en termes de solidité et peut être utilisée comme un bureau ou une table de réunion lorsque le système est éteint. Une contrainte est toutefois présente : le contact entre un objet métallique et la table en fonctionnement est proscrit, sous peine de provoquer des interférences.

- Le système de capture des traits est composé d'un stylo électronique aux avantages variés, qui le rapprochent d'un stylo courant : il est fin et ne pose pas de problème d'ombres ; il ne nécessite pas d'alimentation en énergie ce qui réduit son poids et son encombrement ; et il est plus équilibré et plus facile à manipuler que les autres stylos électroniques. En outre, il octroie une bien plus grande précision que la plupart des autres dispositifs à stylo ou que les interfaces tactiles. Ce dernier point est essentiel car l'activité de dessin ne peut souffrir de trop grandes imprécisions : un décalage d'un ou deux millimètres est acceptable pour déplacer des documents mais pas envisageable pour le dessin d'architecture.

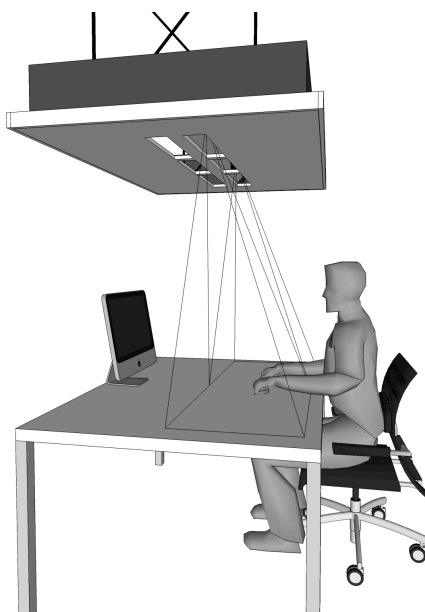


Figure 26
Position de l'utilisateur par rapport à la projection.

1.2.2. EsQUIsE

Le logiciel EsQUIsE est un logiciel d'interprétation d'esquisses de conception architecturale. Il reconnaît et interprète les esquisses numériques dessinées à main levée par le concepteur à l'aide d'un stylo électronique et, sur base de ces interprétations, construit un modèle sémantique architectural du bâtiment destiné à alimenter une série d'évaluateurs. Ceux-ci ont pour objectif de produire des représentations alternatives de l'objet architectural qui peuvent être renvoyées au concepteur (figure 27).

Grâce à un système d'infographie floue, le logiciel reconnaît les traits dessinés de manière séquentielle et leur assigne différentes propriétés. De même, les légendes écrites sont reconnues et interprétées. Ces informations alimentent la construction, en temps réel, d'un modèle géométrique du dessin.

Le module d'interprétation est chargé de traduire l'information géométrique issue du dessin en un modèle sémantique de l'objet dessiné. L'outil reconnaît ainsi différents éléments tels que les espaces-fonctions, les murs, les vitrages, les colonnes ou encore les annotations textuelles. Par exemple, un cercle, en fonction du contexte, pourra être interprété comme un local circulaire, comme une colonne ou encore, comme la lettre « O ». Le mécanisme de reconnaissance se base sur un système multi-agents, chargé de choisir le plus probable des scénarios de reconnaissance

potentiels (voir Leclercq, 1999, 2004 ; Juchmes, Leclercq & Azar, 2004, 2005 ; Leclercq & Juchmes, 2002 pour plus de détails). Ceci se passe sans que le concepteur en soit informé, pour ne pas perturber son action.

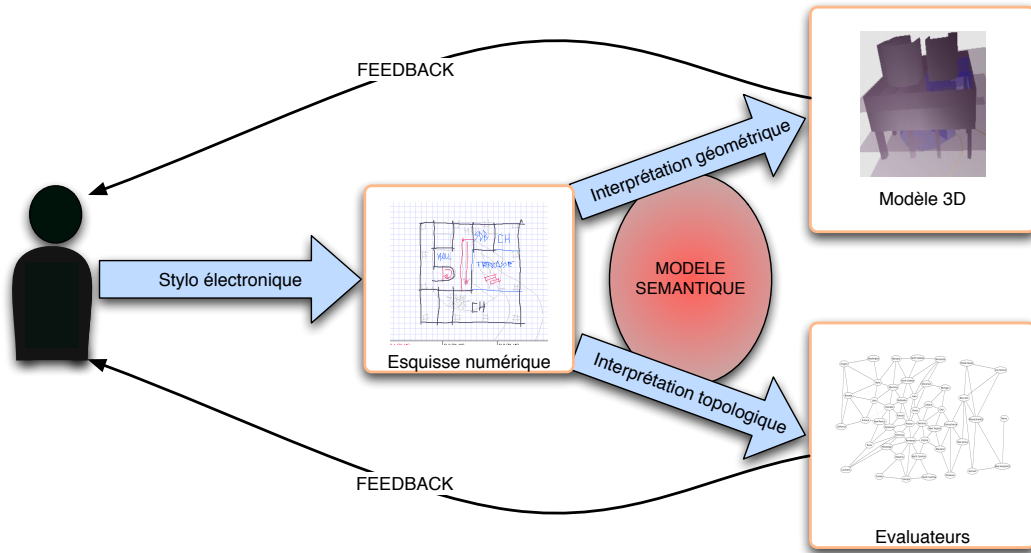


Figure 27
Composition du logiciel EsQUIsE.

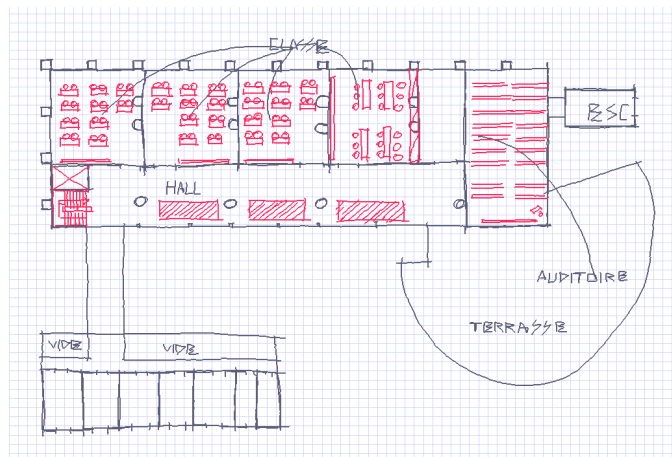


Figure 28
Dessin à main levée sur EsQUIsE.

Enfin, une série d'évaluateurs, alimentés par le modèle sémantique, sont disponibles à la demande du concepteur. Le système est par exemple capable de construire un modèle en trois dimensions, pour visualiser la forme de l'ouvrage (figure 29), de calculer le métré du bâtiment en temps réel et de donner une estimation des besoins énergétiques (chauffage et climatisation). Ces évaluateurs sont aussi alimentés automatiquement, sans intervention du concepteur et en temps réel.

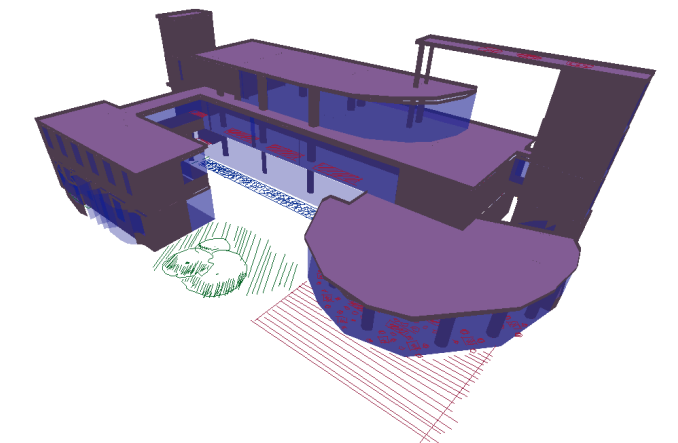


Figure 29
Modèle 3D auto-généré par EsQUIsE.

La figure 30 présente la dernière version de l'interface du logiciel, qui se veut aussi épurée que possible.

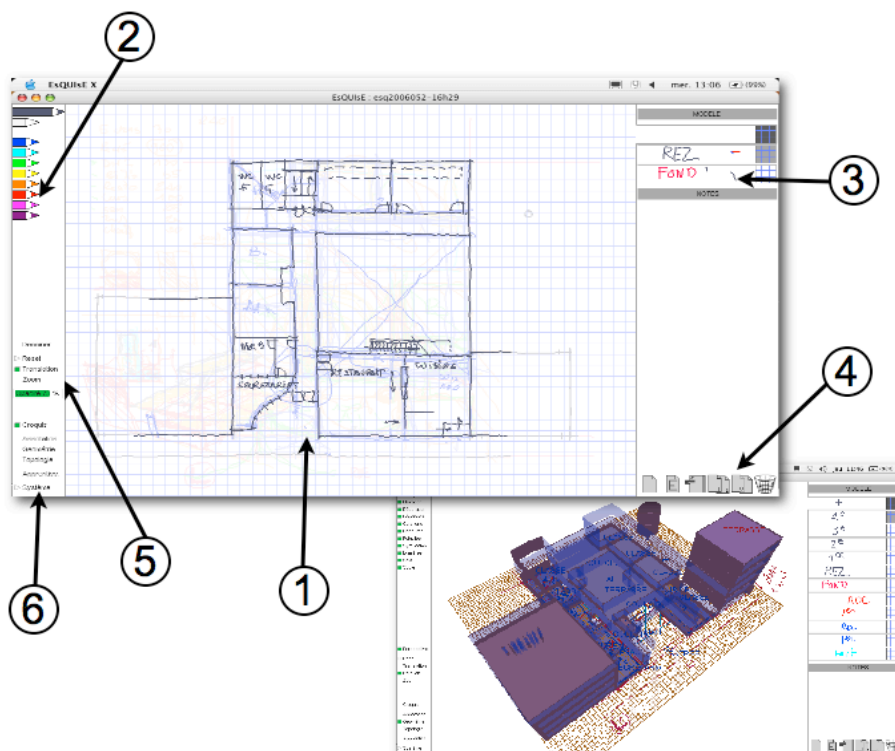


Figure 30
Interface EsQUIsE version 2.

Une zone large (1) permet le dessin sur des calques virtuels à l'aide d'une palette de crayons et d'une gomme numériques (2). Chaque calque est représenté par un onglet (3). L'utilisateur peut librement nommer ces onglets et les agencer de manière simple (*drag and drop*) afin de gérer la superposition des calques virtuels dans le modèle. Il peut facilement créer, effacer ou dupliquer des calques grâce aux icônes d'édition (4). Des options de manipulation du calque (rotation, translation, zoom) sont disponibles dans la zone de manipulation (5) et la transparence des

calques virtuels est paramétrable. Enfin, la zone des options (6) permet de passer d'un mode à l'autre (mode croquis, mode 3D, autres évaluateurs, préférences, etc.). Le concepteur peut dessiner tout-à-fait librement sur les calques virtuels grâce aux stylos virtuels de différentes couleurs. Seuls les traits noirs sont interprétés par EsQIIsE pour former le modèle du bâtiment, les autres couleurs étant destinées aux notes ou décorations. Les calques sont semi-transparents et peuvent être facilement agencés les uns par rapport aux autres⁴⁶.

La conception de ce prototype s'est arrêtée en 2007. Mais le système multi-agents est actuellement en cours de redéveloppement⁴⁷.

1.2.3. SketSha

Le logiciel SketSha (Sketch Sharing) consiste en une palette de dessins partagés⁴⁸. Il permet à plusieurs postes distants d'être connectés à un même espace de travail, dans lequel des documents de différents types (plans, photos, textes, etc.) peuvent être importés et annotés avec le stylo numérique. Le logiciel capture les traits qui composent les dessins et les annotations et les transmet en temps réel, via une connexion Internet standard, à l'ensemble des postes de travail connectés. L'interface du logiciel (figure 31) est proche de celle d'EsQIIsE. La taille de la fenêtre principale est maximisée afin d'offrir un espace de travail le plus large possible. Une palette spécifique est destinée à la gestion des documents (leur superposition et leur transparence) et une palette d'outils virtuels propose un feutre fin et des stylos et surligneurs de différentes couleurs.

SketSha propose un système de manipulation des calques plus sophistiqué qu'EsQIIsE. Toutes les manipulations des documents (rotation, translation et zoom) dans l'espace de travail de SketSha se font via un *widget* de manipulation spécifiquement conçu pour l'interaction au stylo (figure 32). Le *widget* peut être déplacé dans l'espace de travail pour délimiter la cible de chaque manipulation (le point vers lequel le zoom est dirigé ou autour duquel s'effectue la rotation). Celle-ci peut se faire en un seul mouvement du stylo (en l'occurrence par un *drag-and-drop* démarrant de l'icône de la manipulation souhaitée). Les différents calques sont manipulables seuls ou en groupe, ce qui augmente les possibilités d'agencement de l'espace de travail.

Le système est complété par un dispositif de visioconférence (Skype) installé sur un écran de 24 pouces avec caméra intégrée. Celle-ci permet aux participants de se voir à une échelle s'approchant du 1:1 et constitue aussi un moyen très simple pour éviter les déviations du regard entre les interlocuteurs distants. Cet environnement au complet - Bureau Virtuel, SketSha et visioconférence - est appelé SDC, Studio Digital Collaboratif (figure 33).

⁴⁶ Notons que cette interface correspond au deuxième prototype d'EsQIIsE. Le premier prototype, aussi utilisé dans nos études, répond à la même logique mais possède quelques différences, les plus significatives concernant la permanence du modèle 3D et la disposition de la zone des calques. Dans le prototype 1, le modèle 3D est présent dans une fenêtre séparée du croquis, ce qui permet l'affichage simultané du croquis et de la 3D et leur synchronisation continue. Dans le second prototype, la 3D et le croquis sont deux modes situés dans la même zone de l'interface, ce qui empêche leur affichage simultané. La zone des calques est présentée de manière horizontale (en bas de la zone de travail) dans la première version, et de manière verticale dans la seconde (zone (3) dans la figure 30).

⁴⁷ Ce redéveloppement s'effectue dans le cadre du programme NEMO, bourse de doctorat FNRS de Jean-Noël Demaret, informaticien au LUCID.

⁴⁸ Un descriptif technique de l'application peut être trouvé dans Safin, Delfosse & Leclercq (2010).

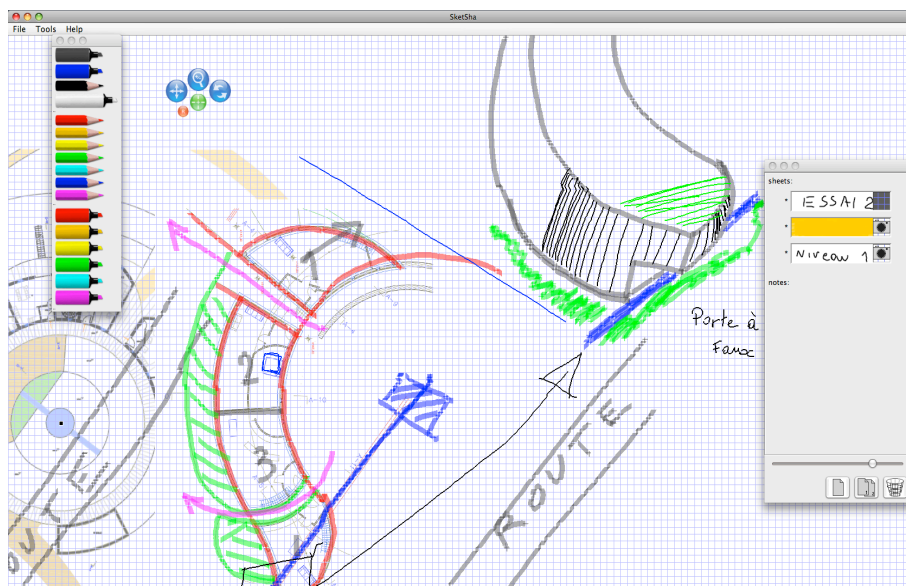


Figure 31
Interface de SketSha.



Figure 32
Widget de manipulation.



Figure 33
Studio Digital Collaboratif.

Les utilisateurs peuvent importer plans et images préalablement réalisés et les annoter ensemble à distance. Chaque action sur un des environnements est automatiquement et directement visible sur les autres. L'espace de travail est strictement partagé entre les différents postes connectés, lesquels partagent un point de vue identique. En outre, la position du stylo du partenaire distant est affichée localement, ce qui permet d'effectuer des gestes de pointage.

Ainsi, le Studio Digital Collaboratif est un environnement multimodal de collaboration à distance. Il supporte les modalités verbales (par l'audio), graphiques (par le dessin partagé) et visuelles, telles que les croisements de regards et, dans une certaine mesure, les gestes (par la visioconférence). Il possède plusieurs des caractéristiques de la coprésence de Clarck et Brennan (1991), à savoir l'audibilité, la visibilité, la co-temporalité, la simultanéité et la séquentialité. Le SDC ajoute également une dimension de réexamen par l'intermédiaire de la persistance des annotations. Il s'agit donc, à ce jour, d'un des environnements les plus riches de collaboration synchrone à distance.

1.3. Augmentations visées par ces dispositifs

Comme évoqué à plusieurs reprises, ces dispositifs sont conçus pour garder les qualités du dessin à main levée⁴⁹, à savoir la souplesse, la simplicité et l'immédiateté (voir chapitre 2, point 3.3). Ceci est permis grâce à l'utilisation du stylo électronique et du papier numérique, se rapprochant des situations habituelles de dessin d'esquisse. Pour garder l'ambiguïté nécessaire au dessin d'esquisse, aucune fonction de « *beautification* » n'a été implémentée : les traits apparaissent tels que dessinés, sans être redressés, coupés ou allongés pour gérer les intersections.

Mais ces dispositifs sont aussi conçus pour tirer parti de l'outil numérique afin d'apporter trois types d'augmentations à l'utilisateur :

- des augmentations liées au papier numérique ;
- des augmentations liées à l'interprétation de croquis ;
- des augmentations liées au partage de croquis.

1.3.1. Augmentations liées au papier numérique

La numérisation du support octroie certaines fonctionnalités indisponibles sur papier réel.

- **Zoom.** Le zoom est possible sur support numérique, ouvrant donc la possibilité de nouvelles appropriations du dessin. Cette fonction crée une contrainte supplémentaire quant à l'échelle du dessin puisque la taille de l'affichage dudit dessin est sensible au facteur de zoom. L'échelle n'est donc pas fixée définitivement et directement au dessin mais dépend de ce facteur de zoom. Pour pallier à cette difficulté, une option de quadrillage est présente pour aider les utilisateurs dans la gestion de l'échelle.
- **Aides au dessin.** L'utilisateur peut très facilement afficher ou masquer une grille quadrillée superposée aux documents. Celle-ci fournit une aide au dessin, notamment pour la gestion de l'échelle, mais aussi pour le tracé de droites parallèles ou perpendiculaires.

⁴⁹ A noter que cela présuppose bien entendu que les utilisateurs soient habitués à dessiner à main levée. C'est généralement le cas dans le domaine de l'architecture, où les professionnels sont formés pendant leurs études. Dans d'autres domaines, comme la conception mécanique, il s'avère que les professionnels ne sont pas nécessairement de bons dessinateurs. Néanmoins, la pratique d'annotation à main levée est courante dans les réunions de revue de projet. Cette pratique possède le même type d'avantages que sont l'immédiateté, la souplesse et la simplicité.

- **Taille.** La taille de la feuille de papier virtuel est potentiellement infinie, même si limitée dans nos systèmes à une feuille de 4 mètres carrés, afin d'éviter que les utilisateurs puissent se « perdre » dans une feuille de trop grande taille. Une vue globale de la feuille est donc nécessaire. Ceci n'est possible que lorsque le facteur zoom est en position minimale, ce qui engendre des images et dessins difficiles à discerner.
- **Superposition.** Nous utilisons dans nos systèmes la métaphore du carnet de croquis. Ainsi, les calques sont « attachés » ensemble. Tout changement d'ordre de superposition est précis et rapide car les calques se remettent automatiquement dans la position adéquate, alors que sur calque traditionnel, il est nécessaire de ré-agencer précisément les dessins les uns par rapport aux autres.
- **Transparence.** La transparence des calques est paramétrable. Ainsi, il est possible de garder le même support pour effectuer des dessins en transparence, en se basant sur d'autres représentations, et pour tracer des dessins sur un espace vierge et opaque.

1.3.2. Des augmentations liées à l'interprétation des croquis (EsQUIsE)

L'interprétation du croquis dans EsQUIsE permet de générer un modèle sémantique du bâtiment, lequel permet d'alimenter des évaluateurs. Ces évaluateurs à leur tour peuvent construire différentes simulations ou représentations de l'objet. Ainsi, le logiciel « comprend » le dessin de l'architecte et lui envoie des informations. Un dialogue s'instaure donc entre l'architecte et le logiciel. Dans ce cas-ci, l'information renvoyée est un modèle en trois dimensions du bâtiment inféré à partir des esquisses imprécises du concepteur⁵⁰. EsQUIsE se situe donc dans à la fois dans les paradigmes de l'interprétation de croquis et la modélisation 3D sur base d'esquisses (voir chapitre 2, point 5). Sur ce dernier point, il se différencie des logiciels de SBIM existants car les croquis ne sont pas ici destinés spécifiquement à la modélisation 3D : il s'agit de croquis 2D usuels, et ce sont les agents logiciels qui se chargent de transposer cette information planaire en information tridimensionnelle.

L'idée sous-jacente est de permettre à l'environnement informatique la création de nouvelles représentations externes qui alimentent la réflexion du concepteur. Ces représentations ont pour but un changement de point de vue du concepteur sur l'objet architectural. En effet, comme évoqué (voir chapitre 2, point 2.8), le changement de perspective est en conception un processus majeur qui permet plusieurs mécanismes essentiels.

- La **structuration** du problème (Darses, 1992). Le changement de point de vue permet l'identification d'autres éléments du contexte qui viennent enrichir le modèle mental du concepteur. Ces vues complémentaires de l'objet permettent l'identification des contraintes et facilitent leur propagation.
- L'émergence de **découvertes inattendues**. Les représentations alternatives peuvent proposer de nouveaux indices visuo-spatiaux pour la réinterprétation (Suwa *et al.*, 1998) et, par conséquent, encourager la créativité (Bonnardel, 2003).
- Les **évaluations** sont facilitées par des visions plus complètes et plus riches de l'objet, amenées par la multiplication de perspectives (Bonnardel & Sumner, 1996).
- La **détection des erreurs** (Safin *et al.*, 2008a, 2008b) est aussi facilitée : les différentes conséquences des actions sont plus aisément identifiables lorsque le concepteur dispose de représentations alternatives de son objet. Il peut alors diriger son attention vers d'autres caractéristiques, potentiellement plus pertinentes pour la détection.

La représentation 3D d'EsQUIsE a un statut particulier : elle est basée sur les croquis de l'utilisateur, c'est-à-dire sur ses propres externalisations, mais est générée par un programme

⁵⁰ Le logiciel est également capable de procéder à une évaluation des besoins énergétiques du bâtiment, mais nous n'avons pas utilisé cette fonction dans nos études.

informatique, extérieur au concepteur. Ainsi, ces représentations « auto-générées » ont pour objectif de prendre le rôle d'un artefact cognitif à part entière.

Alors que ce changement de perspective est soutenu par l'apport d'un modèle 3D, l'interaction au stylo se veut simple, souple et rapide, facilitant ainsi le raisonnement analogique (Leclercq & Heylighen, 2002), les découvertes inattendues (Suwa *et al.*, 2000) et donc la génération de solutions. L'environnement vise à préserver les atouts majeurs des outils papier-crayon : l'utilisation de la transparence pour faciliter les évaluations comparatives (Bonnardel, 1999) et les duplications (Goel, 1995) ; l'utilisation de nombreux supports pour autoriser la coexistence de plusieurs solutions et l'agrégation de dessins inter-reliés (McCall *et al.*, 2001) ; et le caractère flou de l'esquisse pour favoriser la liberté d'interprétation (Hannibal *et al.*, 2005) et sa réinterprétation (Goldschmidt, 1991, Suwa *et al.*, 1998).

Ainsi, les possibilités graphiques des dessins se veulent proches de celles du crayon : aucune couche de *beautification* (redressement des traits, gestion des intersections, etc.) n'est ajoutée, contrairement à la plupart des logiciels de dessin. Les dessins informatisés, « propres », sont en effet jugés comme plus finis et moins créatifs (Hannibal *et al.*, 2005).

EsQUIsE tente donc de tirer profit de deux aspects complémentaires : soutenir les activités de formulation et d'évaluation avec les capacités logicielles d'une part et, d'autre part, soutenir les activités génératives par les modes d'interaction-esquisse proposés.

1.3.3. Des augmentations liées au partage de dessins (SketSha)

Dans SketSha, l'augmentation offerte au dessin est sa présence simultanée dans plusieurs espaces distants. Ainsi, l'environnement ouvre de nouvelles voies à la communication distante synchrone. L'interaction graphique permet d'ajouter une nouvelle modalité aux échanges, correspondant, *a priori*, aux usages en situation de coprésence, où l'annotation de documents est un élément central de la communication (Boujut *et al.*, 2006). L'esquisse sort ici de son strict rôle de support à la simulation graphique et au dessin, pour devenir aussi un média de communication complémentaire à la parole et aux gestes portés par la visioconférence. Ainsi, le dispositif se rapproche des situations de coprésence (Olson & Olson, 2000) : l'esquisse partagée en temps réel permet un *feedback* rapide, la modalité graphique amène un nouveau canal de communication et cette modalité renforce les échanges non-verbaux, ce qui favorise les nuances dans l'expression. Enfin, une augmentation essentielle apportée par ce dispositif, en comparaison aux autres systèmes de communication à distance, est la possibilité de co-référence aux objets ainsi que la spatialité de cette référence. Des objets partagés (plans, modèles, esquisses, etc.) peuvent pleinement faire partie du contenu de la communication.

Ainsi, le dispositif vise à supporter plusieurs aspects de la collaboration.

- L'**action awareness** (Carroll *et al.*, 2003) est soutenue par les gestes de pointage et les annotations à visée déictique. Ainsi, il est plus aisé de comprendre qui effectue quelle action quand les partenaires partagent le même espace de travail. La vision permanente du pointeur distant permet de situer l'action du partenaire. Le cadrage de la visioconférence (plan taille) permet de voir les mains des partenaires distants et d'appréhender certains gestes.
- L'**activity awareness** (Carroll *et al.*, *ibid.*) est portée par la parfaite correspondance entre les deux espaces de travail distants. Les documents affichés sont les mêmes, l'espace d'interaction est identique et les actions des partenaires sont visibles, ce qui permet de situer l'avancement du travail.
- La **construction et le maintien d'un référentiel commun** sont également soutenus par la création d'un espace de travail commun. L'import, l'affichage de différents documents et les

possibilités souples d'annotation, encouragent les échanges sur ces documents de même que la création d'une connaissance partagée pour l'action et le projet.

- La **communication**. Alors que les dispositifs de visioconférence classiques supportent l'audibilité, la visibilité (partielle), la co-temporalité, la séquentialité, et, dans une moindre mesure, la simultanéité⁵¹ (Clarck & Brennan, 1991), le Studio Digital Collaboratif, par la modalité graphique qu'il ajoute, renforce quant à lui la simultanéité, grâce au partage du dessin en temps réel, et ajoute un critère de réexamen par les annotations, qui constituent des traces graphiques persistantes.
- L'**expression d'idées et le processus argumentaire**. L'esquisse numérique est avant tout un moyen d'expression graphique qui se veut proche du papier-crayon. Les différentes caractéristiques de ce dessin et les possibilités qu'il offre se veulent équivalentes à celles d'EsQUISSE (voir *supra*).
- L'**évaluation collective**. En partageant un espace de grande taille à la transparence paramétrable, le dispositif permet l'import de plusieurs documents de nature différente et l'affichage du même point de vue sur ces documents à tous les partenaires. Ces possibilités concourent à simplifier les modes d'évaluation, notamment comparative (Bonnardel, 1999) et analytique/comparative (Détienne *et al.*, 2005).

Avec ces caractéristiques, l'objectif est de soutenir des versions « fortes » de la collaboration.

Le partage de l'espace de travail permet aussi des augmentations par rapport à la situation de coprésence. La duplication du même point de vue n'est pas possible dans des réunions où chacun se situe à un emplacement différent autour de la table et n'a donc pas la même vue sur les documents (ce qui peut être particulièrement gênant pour des annotations textuelles). Ce partage strict rééquilibre les rapports entre les personnes : d'ordinaire, on observe souvent la mobilisation des représentations par un seul individu, qui les oriente dans sa direction, voire les positionne près de lui. Le SDC crée deux environnements strictement identiques quant à leur affichage. En outre, l'interaction simultanée des participants sur le même objet est rendue possible par ce dispositif. En effet, la feuille virtuelle de dessin est présente dans deux environnements distants, ce qui signifie qu'elle ne se situe pas dans le champ d'interaction d'un participant unique, tel qu'on le constate souvent dans des réunions en présence où, à un instant t, le plan annoté est souvent approprié par un seul participant. Ici, il est par exemple possible de dessiner à deux en même temps sur la même zone du dessin, car les stylos physiques et le corps du partenaire, situés à distance, ne font pas obstacle à son propre stylo et son propre bras. A ce sujet, Pauchet *at al.* (2007) ont montré que cette interférence physique pouvait avoir un impact négatif sur la collaboration et inciterait les individus à travailler sur des tâches séparées.

1.3.4. Limites des dispositifs

Ces trois dispositifs comportent évidemment certaines limites, listées en quatre groupes.

- **Précision du dessin**. L'utilisation du Bureau Virtuel n'autorise pas un dessin d'une finesse comparable à celle d'un stylo ou d'un crayon bien taillé. La largeur des traits est de deux pixels, ce qui équivaut à environ un millimètre sur la surface de travail projetée.
- **Limitation des traits**. Les caractéristiques inhérentes au dessin numérique le distinguent d'un dessin traditionnel. En effet, le dispositif matériel ne prend pas en compte l'inclinaison ou la pression du stylo lors du dessin. Une quantité constante d'encre virtuelle est utilisée pour chaque trait, indépendamment de son mode de réalisation. Les traits ne sont donc pas plus marqués si l'utilisateur appuie plus fort et deux traits strictement superposés ne créeront pas un trait plus foncé (à l'exception des surligneurs, dont les traits sont semi-transparents). Cette limitation ne permet pas autant de nuances que celles autorisées par le crayon traditionnel.

⁵¹ Compte tenu de certaines limitations techniques, il est en effet difficile de parler à deux en même temps de manière intelligible en visioconférence. La simultanéité est cependant portée par la modalité visuelle : l'image du partenaire peut être vue en même temps qu'un discours est énoncé.

- **Papier virtuel.** Le support de dessin est du papier virtuel, qui fournit un espace en deux dimensions pour le tracé. Il ne parvient cependant pas à réellement émuler du papier traditionnel, objet tangible et tridimensionnel, qui est intuitivement pliable, retournable et superposable. Même si les différentes fonctions de manipulation et le système de superposition des calques virtuels permettent de nombreuses opérations de déplacement, ces dernières ne sont pas aussi aisées qu'avec une feuille traditionnelle.
- **Inconvénients matériels.** Le dispositif matériel, une table électronique, possède deux inconvénients majeurs. D'une part le contact avec des objets métalliques (montres, canettes, etc.) crée des interférences aux effets surprenants. D'autre part, un déplacement involontaire de la table (suite à un choc par exemple) crée un décalage entre la capture et la projection, c'est-à-dire entre la pointe du stylo et le trait. Ces inconvénients ne sont cependant pas critiques et peuvent être résolus avec quelques ajustements simples comme la fixation de la table à un support et le retrait des objets en métal.

Cette section décrit trois applications du concept d'esquisse numérique en conception architecturale, développées au laboratoire LUCID :

- *le Bureau Virtuel, dispositif matériel de grande taille pour le dessin numérique à main levée ;*
- *EsQUiSE, un interpréteur de croquis d'architecture affichant un modèle 3D du bâtiment esquissé en temps réel ;*
- *SketSha, un logiciel de partage de croquis, de documents et d'annotations à distance.*

Nous avons d'abord synthétisé les objectifs et la philosophie qui ont soutenu au développement de ces dispositifs, en décrivant le paradigme de l'ordinateur invisible et les objectifs spécifiques de ces environnements. Nous les avons ensuite décrits en détail.

Avant de conclure sur les limites de ces systèmes, nous avons évoqué trois types d'augmentations qu'ils proposent :

- *les augmentations liées au caractère numérique du croquis, issues principalement de l'usage du stylo et des calques numériques, et essentiellement relatives à des possibilités de manipulations, aux propriétés du support électronique et à des fonctions spécifiques ;*
- *les augmentations liées à l'interprétation de croquis, notamment les différents avantages attendus d'une représentation 3D auto-générée : aide à la structuration du problème, à l'évaluation et à la détection des erreurs ;*
- *les augmentations liées au partage de croquis, qui visent à soutenir des versions « fortes » de la collaboration à distance, en favorisant l'awareness, le grounding, la communication, l'argumentation et l'évaluation.*

2. Questions de recherche

Notre travail interroge les modes d'externalisation graphique en conception et l'opportunité de l'utilisation de l'esquisse numérique comme vecteur d'aide à la conception individuelle et collective.

Comme nous l'avons vu, les différentes représentations externes et leurs propriétés structurent l'activité cognitive des individus les mobilisant. Le processus d'externalisation, qui consiste à transcrire une pensée sur une représentation, n'est pas automatique mais est largement dépendant du média de cette externalisation : il s'agit de traduire la pensée de la façon la plus efficace possible en fonction des objectifs poursuivis et en fonction des moyens disponibles. C'est cette dynamique que nous cherchons à appréhender dans ce travail.

En particulier, nous souhaitons approfondir la connaissance de l'impact du média particulier qu'est l'esquisse numérique sur l'activité cognitive. En effet, malgré le développement de nombreux systèmes à stylo électronique dans les laboratoires de recherche, rares sont les études qui investiguent en profondeur l'utilité de ce mode d'interaction, qui évaluent son intérêt pour l'utilisateur et son activité et qui questionnent son utilisabilité, donc sa facilité d'utilisation et son efficacité. Or, l'utilité et l'utilisabilité sont deux critères essentiels pour l'acceptabilité d'un environnement technologique⁵² (Nielsen, 1993). Ce manque de connaissances est aussi probablement une des raisons qui expliquent que ces logiciels peinent à trouver une place dans les bureaux d'architecture. L'idée est de proposer une étude d'usages approfondie des opportunités que l'esquisse numérique ouvre mais aussi des nouvelles contraintes qu'elle induit.

L'objectif que nous poursuivons dans ce travail est de mieux comprendre l'impact des technologies d'esquisse numérique dans le processus de conception et de collaboration. Il s'agit donc d'éprouver les augmentations identifiées au chapitre précédent (augmentations liées au papier, à la représentation 3D et au partage de dessins) et d'identifier les limites de l'esquisse numérique en support aux différents types d'activités qui l'exploitent. Trois hypothèses guideront nos observations, qui seront déclinées au travers de trois études.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

L'enjeu est d'identifier le rôle et l'efficacité des augmentations liées au papier numérique. Il s'agit aussi d'éprouver la capacité de l'esquisse numérique et du stylo électronique à soutenir des interactions dites « naturelles ».

L'objectif des logiciels d'esquisse numérique vise en effet à conserver les propriétés du papier-crayon (souplesse, immédiateté, etc.) tout en offrant des possibilités de traitement informatique (telles que l'interprétation du croquis ou son partage à distance). Mais, comme le souligne Norman (2011), fournir un espace d'interaction présumé simple, comme l'interaction au stylo, ne garantit pas *de facto* son utilisabilité, laquelle se base sur trois présupposés (Dumas & Reddish, 1999) :

⁵² A noter que d'autres critères comme le coût, la fiabilité et l'acceptabilité sociale (le fait que le logiciel ne soit pas contraire à des normes ou valeurs) concourent à la réussite de la mise en service de nouveaux produits et environnements (Nielsen, 1993). Ces critères ne seront cependant pas explicitement étudiés ici.

- **Les utilisateurs utilisent des systèmes pour parvenir à un but de manière efficace**, ce qui implique que le dispositif doit permettre d'atteindre les objectifs des architectes ;
- **Les utilisateurs sont accaparés par la réalisation de leurs propres tâches**, donc l'utilisation d'un système doit faciliter le travail, ou du moins ne pas le contraindre ;
- **Ce sont les utilisateurs qui décident si un produit est facile à utiliser ou non**, ce qui signifie que les développeurs ne peuvent statuer sur l'efficacité de leur design, mais que l'utilisabilité doit être éprouvée en situation.

Nombreuses sont les méthodes qui testent l'utilisabilité, mais les plus efficaces reposent sur l'empirisme (Nielsen, 1994). Les environnements innovants ne peuvent donc faire l'économie d'études d'usages approfondies pour tester leur capacité à soutenir les activités qu'elles visent à supporter. Tel est l'objectif de notre approche.

Nous cherchons à identifier quelles sont les contraintes propres au dessin numérique, au stylo électronique et aux calques virtuels, qui impactent l'activité de conception. En particulier, l'insertion du dessin dans un environnement informatique implique une nécessaire réduction des possibilités d'expression : le stylo numérique, à l'heure actuelle tout du moins, ne peut être aussi riche pour l'expression qu'un éventail de crayons, feutres, surligneurs, stylos, etc. utilisés classiquement dans les activités de dessin. Les résolutions d'écran encore limitées et les technologies à stylo imparfaites réduisent les possibilités du dessin. Nous cherchons à jauger l'impact de ces limitations de l'expressivité sur les caractéristiques graphiques des dessins numériques, mais aussi sur le déroulement des différentes activités qu'il médiatise.

Notre hypothèse est que le dessin numérique ne possède pas la même densité et richesse sémantique que le dessin papier-crayon. Compte tenu des limitations évoquées ci-dessus, nous prévoyons que, en comparaison au papier-crayon, les dessins numériques seront moins nombreux, moins denses et que les productions textuelles soient assez limitées, puisque particulièrement difficiles à effectuer sur le Bureau Virtuel. Néanmoins, les esquisses numériques devraient remplir les mêmes fonctions que leur équivalent papier.

Hypothèse 2 : les représentations générées automatiquement par un logiciel ont un impact structurant sur l'activité.

Les différentes représentations utilisées par les architectes ont chacune leur spécificités, contraintes et objectifs propres. Elles fournissent des ressources structurantes pour l'action, notamment en allégeant la charge mentale, en structurant le comportement, en matérialisant l'information et en étendant la cognition (voir chapitre 2, point 1).

La tradition du SBIM (*Sketch-based Interfaces for Modelling*), dont le logiciel EsQUISE est un prototype avancé, vise à fournir, sur base de l'interprétation de croquis numériques, des représentations externes alternatives de l'objet architectural. Dans le cas présent, il s'agit d'une représentation tridimensionnelle auto-générée par le logiciel.

Nous formulons l'hypothèse que cette représentation particulière va être mobilisée comme ressource pour l'action : sa présence devrait en effet aider le concepteur à changer son point de vue. Ce changement de point de vue devrait faciliter la structuration du problème, l'évaluation des solutions et la gestion des erreurs. Mais, en corollaire, cette représentation nouvelle va structurer le comportement par l'intermédiaire des règles sous-tendant sa construction (règles externes, Zhang & Norman, 1994). Cette structuration des actions et comportements des utilisateurs devrait s'opérer de deux manières :

- D'une part ce modèle 3D auto-généré fournit une ressource inédite pour l'action, à savoir une représentation alternative qui permet au concepteur un changement de point de vue sur l'objet. L'exploitation de cette ressource devrait modifier les stratégies de conception des utilisateurs d'EsQUiSE. En particulier, les réflexions liées au volume et à la gestion des étages et des hauteurs devraient être impactées.
- D'autre part, la construction de ce modèle nécessite de souscrire à certaines règles, dictées par l'environnement, les modes d'interaction et d'interprétation des esquisses. Une de ces règles est la nécessité d'une description exhaustive des emprises du bâtiment en vue d'obtenir un modèle complet et cohérent. La présence de ces règles devrait modifier en profondeur l'activité et son organisation.

Hypothèse 3 : l'esquisse numérique, en tant que modalité particulière de communication distante, permet de soutenir des versions « fortes » de la collaboration.

Il s'agit ici d'éprouver les augmentations attendues par l'utilisation de la modalité graphique dans la collaboration distante. Cette modalité inédite vise à soutenir l'*awareness*, le *grounding*, la communication, la génération et l'évaluation collectives de solutions (voir chapitre 3, point 1.3.3). En particulier, cette modalité d'échanges apporte de nouvelles possibilités de co-référence et de spatialité des références, qui sont relativement inédites dans les technologies de collaboration à distance (Olson & Olson, 2000).

En enrichissant les canaux de communications, nous nous attendons à ce que l'esquisse numérique favorise l'émergence de versions « fortes » de la collaboration (co-conception), ce qui constitue un enjeu majeur du soutien à la conception collaborative (Darses *et al.*, 2001). Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation de la modalité graphique dans les échanges synchrones distants permet et encourage une collaboration couplée et de qualité.

Nous cherchons à comprendre l'appropriation de cette nouvelle modalité dans la conception. L'esquisse numérique, en tant qu'outil polyvalent, devrait être utilisée à la fois pour communiquer sur le projet, résoudre le problème et amener du contenu ; à la fois pour gérer le processus en favorisant la coordination, le partage de points de vue et la compréhension des actions de chacun ; et à la fois en complément à la modalité verbale pour gérer les interactions entre les membres du groupe. Grâce à la richesse de ses potentialités, l'esquisse numérique devrait inciter les utilisateurs du système à des échanges riches et couplés et à une collaboration de qualité.

3. Etudes

Pour éprouver ces hypothèses et répondre aux questions qui en découlent, nous menons trois études. Chacune aborde des hypothèses spécifiques, est effectuée dans un contexte individuel ou collectif et se centre particulièrement sur une des activités impliquées dans le projet architectural (la conception, le dessin ou la collaboration), sans toutefois que ce point de vue soit exclusif. En outre, ces études décrivent chacune une activité particulière : la conception en superposition, la mise au net de dessins et l'annotation collective de documents, toutes trois peu référencées dans la littérature.

Dans chacune de ces études, nous investiguons trois caractéristiques de l'esquisse numérique :

- sa forme, via l'analyse des propriétés graphiques de l'esquisse numérique : le nombre de traits, leurs types, les particularités spatiales, la densité d'information, etc. ;
- son rôle, c'est-à-dire les usages et fonctions cognitives du dessin numérique et des représentations auto-générées ;
- sa dynamique, par l'étude des modes d'externalisation graphique en conception.

Nous n'envisageons pas à proprement parler l'analyse du projet architectural (sémantique des dessins, évolutions de l'objet architectural, etc.) car, d'une part, cela sort du cadre d'un travail d'ergonomie focalisé principalement sur l'utilisation des instruments et, d'autre part la particularité des publics et des exercices proposés aux étudiants ainsi que la durée nécessairement limitée des expérimentations rendent les productions relativement spécifiques, ce qui limite les possibilités de généralisation.

Etude	Hypothèses investiguées	Contexte	Focus	Activités étudiées
Etude 1	H1 sur les contraintes du dessin. H2 sur les représentations auto-générées.	Individuel	Activité de conception.	Conception en superposition.
Etude 2	H1 sur les contraintes du dessin. H2 sur les représentations auto-générées.	Individuel	Activité de dessin.	Mise au net.
Etude 3	H1 sur les contraintes du dessin. H3 sur la modalité graphique collaborative.	Collectif	Activité de collaboration.	Annotation de documents.

Tableau 3
Récapitulatif des études.

La première étude se situe dans le champ de la conception préliminaire créative individuelle. Cette étude exploratoire vise à comprendre l'usage qui est fait de la 3D auto-générée par le logiciel EsQUIsE, et à comparer les productions graphiques effectuées sur support numérique et sur papier-crayon (H1 sur les contraintes du dessin). Nous cherchons aussi à comprendre l'impact de cet environnement et des représentations auto-générées sur les stratégies mobilisées par les concepteurs et sur l'organisation de leur activité (H2 sur les représentations auto-générées). Nous montrons qu'EsQUIsE engendre des modes de dialogues particuliers entre le concepteur et les modules d'interprétation. Nous identifions à ce sujet une différence fonctionnelle majeure entre deux types de croquis, servant notamment à ce dialogue. Nous montrons aussi que la présence d'un modèle 3D engendre des stratégies différentes de conception, et que l'esquisse numérique, malgré ses possibilités graphiques plus limitées, permet de porter les différents dessins de conception.

La deuxième étude se centre plus particulièrement sur l'activité de dessin. Par la comparaison de trois situations de conception (avec des outils traditionnels et sur environnement informatique avec ou sans interprétation de croquis), nous cherchons à distinguer les impacts induits d'une part par la numérisation du croquis (H1 sur les contraintes du dessin) et, d'autre part, par son interprétation par un agent logiciel (H2 sur les représentations auto-générées). Outre l'organisation de la conception et les propriétés graphiques des esquisses, nous étudions l'activité de mise au net de dessins, particulièrement impactée par l'environnement et peu étudiée en tant que telle dans la littérature. Nous montrons que la mise au net remplit plusieurs fonctions, que ces fonctions sont partiellement portées par l'esquisse numérique et que les objectifs de cette activité se modifient quand une interprétation est présente. Nous identifions aussi la prégnance d'un principe d'économie dans l'utilisation de l'esquisse numérique.

La troisième étude vise à comprendre le rôle de l'esquisse en tant qu'outil de communication synchrone à distance. Elle prend place dans le cadre d'un atelier de conception international d'une durée de trois mois, outillé par le Bureau Virtuel et le logiciel SketSha. Nous décrivons l'activité collaborative de trois groupes d'étudiants, par la classification et la caractérisation de toutes les productions graphiques échangées par ceux-ci, ainsi que par l'usage des annotations et l'analyse de la qualité du processus collaboratif.

Nous situons le rôle particulier de l'esquisse numérique dans les échanges, analysons les pratiques d'annotation numérique à main levée et identifions les contraintes et opportunités du dessin numérique (H1 sur les contraintes du dessin). Nous mettons en avant des attitudes différentes face à l'utilisation du système, qui peut être considéré soit comme un espace de travail temporaire, soit comme un outil d'édition de documents. Nous montrons qu'il soutient à la fois les versions fortes et faibles de la collaboration et nous identifions les atouts et limites du croquis numérique en support à la collaboration (H3 sur la modalité graphique collaborative). Ce faisant, nous soulignons aussi les principes d'économie cognitive sous-tendant ces usages.

Outre la réponse à nos questions de recherche, chacune de ces études aboutit à la proposition de recommandations pour le développement d'environnements d'esquisses numériques, basées sur les observations et constats de notre approche empirique.

4. Méthodologie générale

Notre méthodologie générale s'inspire largement des « *protocol analysis* », répandus dans l'étude des activités de conception (voir par exemple Purcell & Gero, 1998, Suwa & Tversky, 1997 ou, plus récemment, Tang *et al.*, 2010). Il s'agit de privilégier la profondeur de l'analyse sur la quantité de protocoles recueillis. Nous estimons en effet qu'il n'est pas possible d'observer finement des activités de conception en architecture sur un laps de temps trop limité. C'est ainsi que la durée des exercices proposés dans les différentes études varie de quatre heures en conception individuelle à plusieurs mois pour l'atelier de conception collaborative. Ces durées permettent de nous approcher des conditions réelles d'activités de conception et de renforcer ainsi la validité écologique de nos conclusions, même si cette validité n'est pas l'objectif premier de ce travail (*cf. infra*).

Le choix méthodologique du traitement de données porte sur une approche de type qualitative. A l'instar de Mac Gown, Green et Rodgers (1998) ou de Suwa, Purcell et Gero (1998), l'idée est de préférer une analyse portant sur un nombre limité de participants, mais basée sur une compréhension fine de l'activité de conception, afin de confronter les éléments théoriques et nos hypothèses à des activités décrites de manière exhaustive. Cette méthodologie permet de répondre à l'objectif exploratoire de nos questions de recherche ainsi qu'à la contextualisation de nos études d'usage.

Nos travaux portent sur des populations d'étudiants. Ce choix est justifié par plusieurs raisons. Premièrement, pour répondre à d'évidentes contraintes logistiques : dans un contexte universitaire et avec des moyens limités pour une éventuelle rémunération des participants, il est plus aisé de mobiliser ce public étudiant que des professionnels en agence d'architecture. D'expérience, ceux-ci ont généralement peu de disponibilités pour participer à des expériences qui sortent du cadre strict de leur travail.

Deuxièmement, l'observation d'étudiants nous permet de limiter la variabilité entre les sujets, élément essentiel compte tenu du parti pris évoqué ci-dessus. Ainsi, la faible taille de nos échantillons, nécessaire pour une analyse en profondeur, est compensée par une limitation des différences entre les participants à nos études. Les architectes professionnels ont en effet des formations initiales relativement variées (écoles de type « beaux-arts » ou formations d'ingénieurs) et des habitudes de travail bien différentes, notamment des préférences très marquées pour différents type d'outils (chaque bureau d'architecture développant des habitudes autour de tel ou tel logiciel). Les étudiants, en revanche, partagent un vécu commun et une formation identique, même si certaines préférences et certaines habitudes peuvent se faire sentir.

Troisièmement, les tâches que nous proposons aux étudiants, parfois déroutantes pour des professionnels (délais courts, absence de référence au chantier et aux coûts), sont des problèmes habituellement rencontrés dans les cursus de formation à l'architecture. Les étudiants de quatrième et cinquième année peuvent donc être considérés comme des experts de ce type de problème. Observer de réelles pratiques de conception est difficile sinon impossible en contexte professionnel : la conception est loin d'être circonscrite dans le temps et dans l'espace, et les prototypes que nous utilisons n'ont pas toujours la maturité et la robustesse nécessaires pour pouvoir envisager leur usage en contexte d'agence d'architecture. Les problèmes que nous proposons se rapprochent bien plus d'un contexte scolaire que d'une pratique professionnelle. De ce point de vue, ils sont même parfaitement écologiques : toutes les séances observées s'inscrivent dans le cursus scolaire des étudiants ingénieurs-architectes de l'Université de Liège.

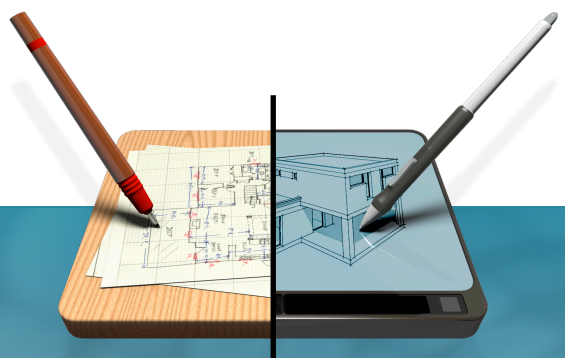
Tous ces éléments attestent que nous ne recherchons pas impérativement la validité écologique de nos données, mais que nous lui privilégions la validité interne. Ce choix méthodologique est aussi guidé par les impératifs pratiques de notre recherche. Dans les approches d'ergonomie de développement, il est plus intéressant d'observer l'usage intensif de peu de sujets que de rechercher une validité statistique. En outre, notre approche se veut essentiellement descriptive : par l'analyse fine des phénomènes observés, nous tâchons de les comprendre en profondeur, plutôt que de prédire avec certitude une apparition de ceux-ci dans toutes les activités de conception. Nous utilisons dès lors des statistiques essentiellement descriptives, et nous employons les statistiques inférentielles avec parcimonie, et essentiellement à titre indicatif.

A noter aussi que nous avons eu l'occasion d'observer, de manière plus ou moins formelle, de nombreux professionnels utiliser les dispositifs étudiés. Nous ne manquerons pas de mettre en relation nos observations systématiques sur des étudiants avec nos connaissances capitalisées en usage professionnel. Aussi, nos observations de l'usage du dispositif par des étudiants ne se limitent pas à celles relatées ici. Le Bureau Virtuel et SketSha ont été utilisés à de nombreuses reprises : l'atelier SDC observé dans l'étude 3 a déjà été mis en place quatre fois, avec une moyenne de quatre groupes d'étudiants travaillant pendant dix séances d'une heure. Les activités papier-crayon prenant place dans les études 1 et 2 ont été reproduites plus d'une trentaine de fois. Elles ont aussi pris place sur d'autres dispositifs que ceux étudiés ici (tablettes-écrans et tablettes graphiques).

Enfin, compte tenu de notre habitude au travail multidisciplinaire et de la nécessité, pour comprendre les activités de conception, de maîtriser le domaine, nous menons systématiquement nos analyses avec des architectes : chercheurs, enseignants ou étudiants dans le cadre de travaux de fin d'études. Nous pensons qu'il est en effet dommage de limiter la richesse de nos analyses au seul point de vue ergonomique, sans s'épauler par des aspects sémantiques propres au domaine. Une lecture croisée des activités permet assurément l'enrichissement mutuel des disciplines qu'elle convoque. Ainsi, si le point de vue de l'acteur passe parfois au second plan, nous nous assurons une compréhension forte des phénomènes observés par la mise en correspondance avec l'avis de professionnels.

CHAPITRE 4

*Première étude
Analyse de l'usage d'un environnement
d'esquisse numérique et d'un modèle 3D auto-
génééré*



1. Introduction

Cette première étude⁵³ vise à comprendre, d'une manière globale, quel est l'usage spontané du logiciel EsQUIsE, logiciel d'interprétation d'esquisses numériques construisant un modèle auto-généré du bâtiment. Cette étude à visée exploratoire cherche principalement à comprendre l'impact de ce logiciel et du Bureau Virtuel - environnement de dessin numérique au stylo électronique - sur l'activité de conception (Voir chapitre 3, point 1.2 pour une description détaillée de ces outils).

Nous nous basons sur l'observation comparative d'activités de conception d'étudiants en architecture avec le logiciel EsQUIsE et avec les outils traditionnels (que nous nommerons ici, par simplicité, papier-crayon). Cette étude vise à éprouver les deux premières hypothèses de ce travail.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

Hypothèse 2 : les représentations générées automatiquement par un logiciel ont un impact structurant sur l'activité.

Pour répondre à ces questions, et pour comprendre la manière dont l'introduction de cette technologie impacte le travail de ces étudiants, nous nous basons sur la formalisation offerte par la théorie de l'activité instrumentée (Rabardel, 1995), qui identifie les relations entre le sujet, l'objet de son activité et les instruments qu'il utilise (figure 34).

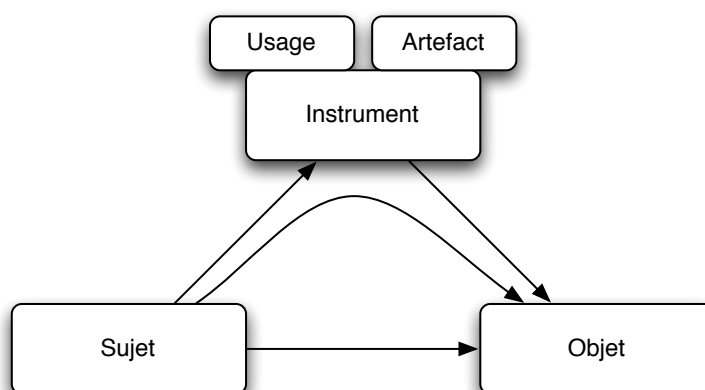


Figure 34
Triangle sujet-instrument-objet.

⁵³ Cette étude a déjà fait l'objet d'une publication dans la revue scientifique RIHM (Revue d'Interaction Homme-Machine, Safin, Leclercq & Decortis, 2007). Le texte original a été remanié pour s'insérer dans la structure globale de la thèse.

Il convient ainsi de comprendre l'outil dans ses dimensions matérielles d'une part, à travers les contraintes qu'il véhicule, et humaines d'autre part, par la façon dont ses utilisateurs se l'approprient et se créent de nouveaux modes d'action. Nous envisageons, en regard de nos hypothèses, l'ensemble des relations du triangle sujet-objet-instrument pour comprendre en profondeur l'usage de l'environnement d'esquisse numérique, à savoir :

1. Nous cherchons à comprendre l'usage qui est fait du modèle en trois dimensions auto-généré. En quoi sert-il l'activité ? La particularité de ce modèle est de représenter l'espace en trois dimensions, contrairement aux plans classiques, dans lesquels la troisième dimension (la hauteur) doit être inférée à partir d'indices présents sur la représentation des dimensions x et y. Dès lors, comment les usages de ce modèle 3D s'inscrivent-ils par rapport aux autres représentations décrivant le bâtiment dans sa troisième dimension, comme les coupes, élévations ou dessins en perspective (relation Sujet-Instrument) ? Hypothèse 2
2. Tout système implique nécessairement un certain nombre de contraintes notamment relatives à l'objet de l'activité. Par l'ouverture du champ des possibilités qui sont offertes au sujet, par les contraintes sur la finalisation de son action ou sur les modalités d'existence de l'instrument, l'objet de l'activité va en partie être modifié (Rabardel, 1995). Dans le cas qui nous occupe, nous cherchons à comprendre si l'introduction d'EsQUiSE et du Bureau Virtuel change la nature des esquisses de conception (relation Instrument-Objet). Hypothèse 1
3. L'introduction d'une nouvelle technologie fait aussi apparaître de nouvelles formes d'activité. Nous cherchons ici à savoir si des organisations émergentes de l'activité de conception découlent de l'introduction d'EsQUiSE et du Bureau Virtuel. A ce titre, le modèle 3D tient une place particulière : en effet, si ce modèle est construit sur base des esquisses produites par le concepteur, il n'est pas directement généré par lui, mais par le logiciel. Partant de l'hypothèse qu'une représentation 3D « auto-générée » a sans doute un impact direct sur la façon dont les étages du bâtiment sont conçus les uns par rapport aux autres, nous nous intéressons particulièrement à ce que nous appelons la « conception en superposition ». Les différents étages d'un bâtiment doivent en effet présenter une certaine cohérence entre eux qui implique l'interdépendance de leur conception. Quelles stratégies les architectes mettent-ils en place pour assurer cette cohérence ? Quelles ressources utilisent-ils pour ce faire ? Ce thème, spécifique à l'architecture n'a, à notre connaissance, jamais été traité comme tel dans la littérature. Notre étude ambitionne donc de comprendre cette activité spécifique et d'évaluer comment l'environnement du Bureau Virtuel et d'EsQUiSE la modifient et la structurent (relation Sujet-Instrument-Objet). Hypothèse 2

Par l'investigation systématique de ces différentes relations, nous tentons donc de comprendre les contraintes portées par le dessin électronique, ainsi que les opportunités qu'il ouvre pour soutenir l'activité de conception créative.

2. Méthode

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi un dispositif d'analyse qualitative de comparaison de l'activité de conception de trois étudiants de dernière année de la filière ingénieur

architecte⁵⁴. Trois étudiants ont été observés, chacun placé dans une situation différente, dont les caractéristiques sont synthétisées dans le tableau suivant.

Situation	Papier-crayon	Prototype 1	Prototype 2
Participant	Participant 1	Participant 2	Participant 3
Outils	Calques réels et crayons	Calques virtuels et palette graphique EsQIse	Calques virtuels et palette graphique EsQIse
3D	Pas de modèle 3D	Modèle 3D permanent	Modèle 3D sur demande

Tableau 4
Situations observées.

La première situation, en tant qu'environnement « naturel », sert de situation de référence. Ici, le concepteur est libre d'utiliser tout outil traditionnel : crayons, feutres, calques, feuilles de papier, équerre, règle, etc. (figure 35). Les deux autres situations permettent d'identifier l'impact spécifique de la 3D ainsi que de l'environnement EsQIse. Dans ces situations, le concepteur travaille au stylo numérique sur le Bureau Virtuel. Il a ainsi à sa disposition un stylo électronique et une palette d'outils virtuels : un crayon noir dont les traits sont interprétés par le logiciel pour créer le modèle numérique du bâtiment, différents crayons de couleurs, non interprétés et servant aux annotations, et une gomme. Le concepteur est libre d'utiliser une règle s'il le souhaite. Les situations 2 et 3 diffèrent par le degré de présence du modèle. Dans la situation « Prototype 1 », le modèle est présent en permanence, dans une fenêtre coexistante à celle des croquis, alors que dans la situation « Prototype 2 », l'utilisateur doit choisir entre l'affichage de ses croquis et celui du modèle⁵⁵ (voir figures 36 et 37).

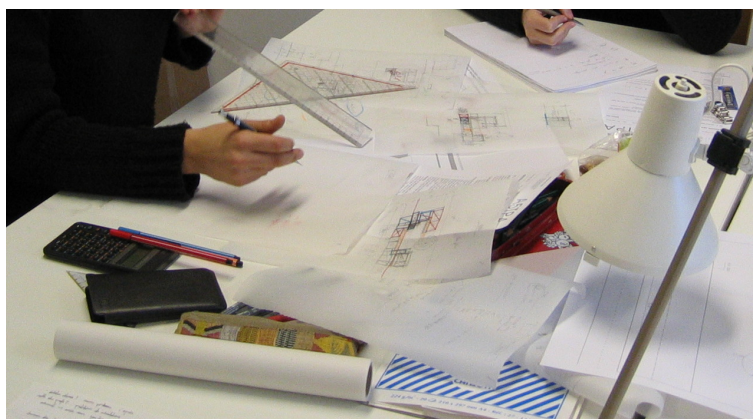


Figure 35
Espace de travail papier-crayon.

⁵⁴ La formation d'architecte en Belgique est possible via deux filières : par des écoles supérieures d'architecture ou par une formation universitaire d'ingénieur civil. Les étudiants qui ont participé à l'expérience terminent la formation d'ingénieur civil architecte.

⁵⁵ EsQIse dans sa version Prototype 1 est légèrement antérieur à la seconde version, Prototype 2. Entre les deux versions, quelques changements mineurs ont été opérés (extension de la palette de couleurs de traits, amélioration de la gestion des calques, refonte de l'interface). Une modification majeure de l'interface est la fusion de la zone de dessin et de la zone du modèle 3D, spécifiquement investiguée ici.

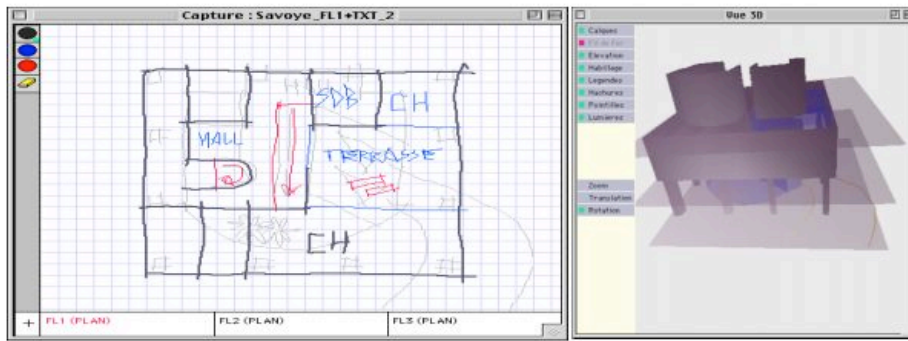


Figure 36

Espace de travail sur Prototype 1. Une fenêtre de visualisation de la 3D est présente en permanence, à côté de la fenêtre de travail sur laquelle est dessiné le croquis (inspiré de la Villa Savoye de Le Corbusier).

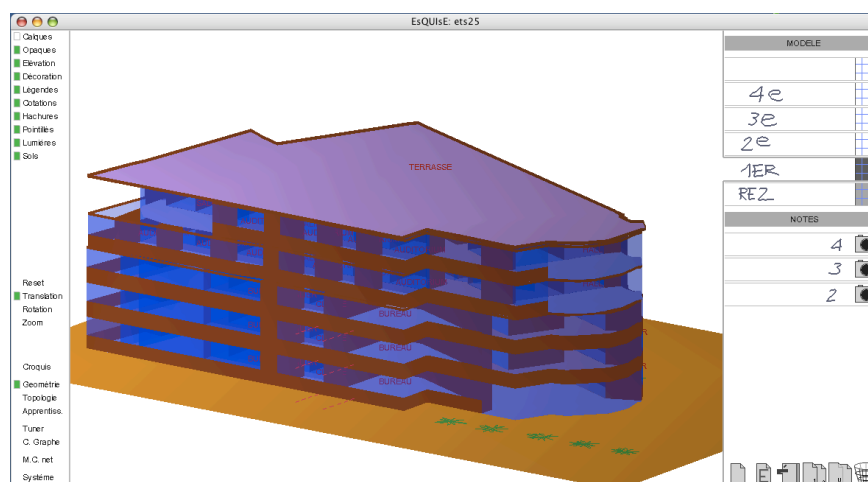
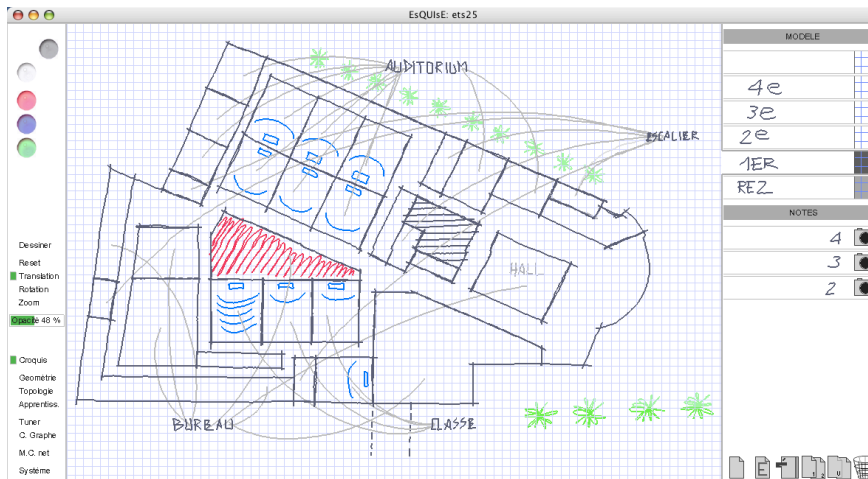


Figure 37

Espace de travail sur Prototype 2. L'utilisateur doit choisir d'afficher soit l'espace de travail avec son croquis numérique (haut), soit le modèle 3D (bas) (croquis inspiré du bâtiment de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal).

2.1. Choix des participants

Les participants sont des étudiants en fin de formation. Ils ont tous la même expérience des tâches de conception. Cela permet d'éviter un biais éventuel lié à la forte variabilité de l'expertise, comme on la trouverait chez des architectes professionnels qui ont chacun développé des pratiques très différentes. En outre, confrontés à de nombreux projets de nature similaire au cours de leurs cinq années d'études, ces étudiants sont déjà rompus à la tâche concernée.

2.2. Tâche

Nous avons fait le choix d'un problème architectural simplifié mais réaliste, accessible aux étudiants de dernière année. L'observation d'activités de conception *in situ* s'avère en effet compliquée et coûteuse, tant cette activité est distribuée dans le temps et dans l'espace.

La tâche proposée aux étudiants ingénieurs-architectes est la conception préliminaire d'une école secondaire professionnelle de deux cent quarante élèves. Proposé depuis plus de dix ans, cet exercice pédagogique est représentatif d'un problème de conception couramment rencontré par les architectes dans leur pratique. Il est cependant adapté à des étudiants, dans la mesure où il s'agit ici d'une conception préliminaire ne faisant pas appel à l'ensemble des compétences des architectes professionnels, notamment celles relatives à la gestion budgétaire, à la mise en œuvre sur chantier, aux contacts avec les entrepreneurs, etc. Les contraintes particulières du bâtiment à concevoir sont décrites dans un cahier des charges synthétique (programme), donné aux étudiants en guise d'énoncé (voir annexe 1), et sont de plusieurs ordres.

- Les contraintes liées au terrain (Figure 38). Le terrain comprend un arbre remarquable et un décrochement important dans le relief (marche) et ce, afin de susciter une réflexion sur la superposition des niveaux du bâtiment. Il est en effet impossible de faire tenir tout le programme dans la partie inférieure ou supérieure du terrain. Il est donc nécessaire de concevoir un bâtiment en plusieurs étages. L'arbre remarquable induit aussi une contrainte pour la composition, celui-ci ne pouvant être détruit ou coupé.
- Les contraintes topologiques, à savoir des prescriptions précises concernant les adjacences et les surfaces des différents locaux, classiquement rencontrées dans ce type de programme architectural.
- Des contraintes fonctionnelles, comme l'accessibilité des personnes à mobilité réduite, la sécurité incendie et l'éclairage naturel. Ces spécifications sont plutôt un rappel des bonnes pratiques que des contraintes spécifiques au bâtiment.
- Des contraintes urbanistiques, comme un alignement de façade à rue. En outre, une contrainte particulière a été ajoutée : les toitures doivent être horizontales⁵⁶.

L'objectif de l'exercice est de réaliser une version préliminaire du bâtiment suffisamment complète pour inclure les concepts principaux. L'exercice est calibré de sorte qu'il puisse être réalisé dans un laps de temps de quatre heures maximum.

⁵⁶ Cette dernière contrainte qui est cependant réaliste, a été mise en place afin que le logiciel EsQUIsE puisse interpréter les esquisses pour en faire un modèle 3D correct. En effet, la construction du modèle s'y fait actuellement par extrusion verticale. Il s'agit en réalité de 2,5D : les plans sont projetés verticalement de manière fixe. Il n'est donc pas possible de générer des toits en pente.

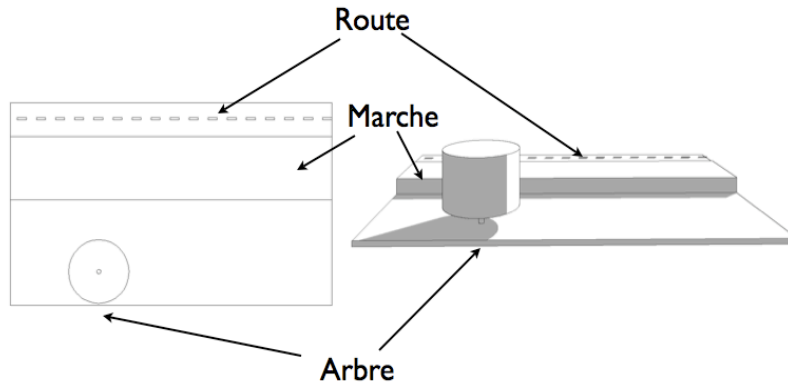


Figure 38

Schéma du terrain avec la marche et l'arbre remarquable. En plan (à gauche) et en perspective (à droite).

2.3. Dispositif

La réalisation de l'exercice est précédée d'une séance de préparation visant d'une part à présenter les tâches et consignes de l'exercice et, d'autre part, à effectuer une démonstration du Bureau Virtuel et d'EsQUISÉ et à fournir l'occasion de se familiariser avec l'environnement pendant une demi-heure.

La gestion des temps de pause est laissée aux étudiants. Il est demandé aux concepteurs de « penser tout haut » c'est-à-dire d'exprimer en permanence leurs « pensées brutes » sans chercher un discours construit ou même cohérent.

Chacune des activités est observée et intégralement filmée par deux caméras, l'une en vue frontale pour appréhender l'ensemble de la scène et l'autre une vue plongeante afin de capturer la création des dessins. Les figures 39 et 40 montrent ces dispositifs d'observations.



Figure 39

Environnement papier-crayon.

Dans l'environnement papier-crayon (figure 39), le concepteur dispose de feuilles de papier, d'un rouleau de papier calque, de plusieurs crayons et surligneurs ainsi que de règles, d'équerres et d'une calculatrice. Dans les deux autres situations (figure 40), les concepteurs travaillent sur le Bureau Virtuel, chacun utilisant une version du logiciel EsQUIsE (Prototype 1 et Prototype 2). Ils disposent tous deux d'un stylo électronique et d'une palette virtuelle permettant l'utilisation de plusieurs couleurs. Lors de ces séances, le concepteur travaille seul. Les autres personnes présentes sur les photos sont des observateurs étudiants architectes et ergonomes.



Figure 40
Environnement du Bureau Virtuel.

2.4. Traitement des données

Le traitement consiste en l'analyse approfondie des vidéos et des productions graphiques issues des activités, soit environ dix heures d'enregistrement vidéo⁵⁷. Notre grille d'observation tient en cinq points.

- Tout d'abord, dans une visée comparative, nous décrivons les trois activités. Cette description adopte un point de vue large sur l'activité. Outre l'identification des outils utilisés et une description sommaire du produit de la conception, nous tentons d'identifier des « phases » dans l'activité et des stratégies de résolution de problèmes. Nous cherchons à comprendre si les différentes activités, dans leur globalité, sont organisées avec une certaine logique.
- Afin de comprendre la dynamique de la conception en superposition, nous identifions, à chaque instant dans le cours de l'activité, le niveau du bâtiment (étage) sur lequel le concepteur travaille. Ces niveaux sont identifiés soit par les verbalisations spontanées du concepteur, soit par l'analyse du dessin. Les périodes de travail sur ces différents niveaux sont regroupées sur des lignes du temps, qui permettent d'appréhender la façon dont l'activité se déroule chronologiquement.
- Pour appréhender l'usage des représentations de la troisième dimension de l'espace, nous comptabilisons la production des coupes, des élévations et des dessins en perspective. Nous notons aussi les moments où le concepteur trace des dessins en perspective, ainsi que ceux où

⁵⁷ Si les participants disposaient de quatre heures maximum pour effectuer le travail, la durée effective des activités, pauses exclues, est de trois heures à trois heures trente par activité.

il manipule le modèle 3D auto-généré. Ces deux derniers types d'actions sont aussi intégrés dans les lignes du temps.

- Enfin, une analyse des productions graphiques présentes sur les différents calques – virtuels ou réels – nous permet de caractériser les multiples dessins, notamment les différences observables suivant les environnements. Nous comparons ainsi les esquisses numériques et les esquisses traditionnelles. Les dimensions qui nous intéressent sont celles qui caractérisent le dessin d'esquisse (voir Leclercq & Elsen, 2007 ou chapitre 2, point 3.4), à savoir la complétude du dessin, la variabilité, la précision et le degré d'accumulation des traits ainsi que la coexistence de plusieurs solutions.
- Sans prétendre à une analyse exhaustive des protocoles verbaux, nous illustrons certaines de nos observations par quelques-unes des verbalisations spontanées des participants qui nous semblent éclairantes.

A noter que toutes les analyses des productions graphiques des participants que nous avons menées ont été effectuées avec l'aide d'un architecte, afin de bien en appréhender le contenu.

Nos observations sont donc présentées en deux parties. La première consiste en une description de chacune des activités observées. Ces descriptions sont subdivisées en une identification des outils utilisés (pôle instrument), une analyse des productions graphiques (objet de l'activité), un schéma du déroulement de l'activité sous forme de lignes du temps et une première identification des démarches de conception en superposition. La deuxième partie traite de la comparaison entre les trois activités. Nous y adressons les stratégies de conception en superposition et l'usage des représentations de la troisième dimension (coupes, élévations, perspectives et modèle 3D).

3. Description des activités

3.1. Situation 1 : Environnement papier-crayon

3.1.1. Outils

Dans l'environnement papier-crayon, nous observons que le concepteur utilise un nombre important de calques ainsi que plusieurs crayons, stylos, marqueurs et surligneurs. Les papiers et calques utilisés sont de tailles différentes, principalement les calques, découpés à partir d'un rouleau. Il utilise aussi une règle, une équerre et une calculatrice.

3.1.2. Productions graphiques

L'activité est caractérisée par la production d'une succession de dessins de brouillon qui sont régulièrement mis au net. Ces esquisses de brouillon, dessinées exclusivement au crayon, comprennent effectivement les caractéristiques de l'esquisse de conception (Leclercq, 2005) : peu de variabilité et peu de précision dans les traits, incomplétude du dessin, accumulation de traits et coexistence de plusieurs solutions. En outre, de nombreuses annotations textuelles sont présentes (cotations, notes, calculs, etc.).

Lors des mises au net, le concepteur utilise des marqueurs de différentes couleurs. Le dessin se différencie : les traits ne sont plus accumulés (un trait représente une paroi) et il n'existe plus qu'une solution sur le dessin. Les annotations sont rares et servent uniquement à nommer les espaces. Ces esquisses nettes servent ensuite de base à de nouvelles esquisses de brouillon. Ainsi, ces deux types de productions graphiques coexistent sur les mêmes calques. Le processus

de mise au net consiste à choisir, parmi l'ensemble des traits présents sur l'esquisse de brouillon, lesquels sont déterminants pour arrêter temporairement une solution.

Le bâtiment conçu comporte trois niveaux : un niveau inférieur sous le décrochement, un niveau 0⁵⁸ et un niveau supérieur. Il comporte deux ailes : une réservée aux classes et l'autre (sur la marche) allouée aux services administratifs et commodités.

La figure 41 montre la dernière version du rez-de-chaussée. On peut y voir la coexistence de traits épais aux marqueurs (mise au net) et de nombreux traits fins au crayon (brouillon).

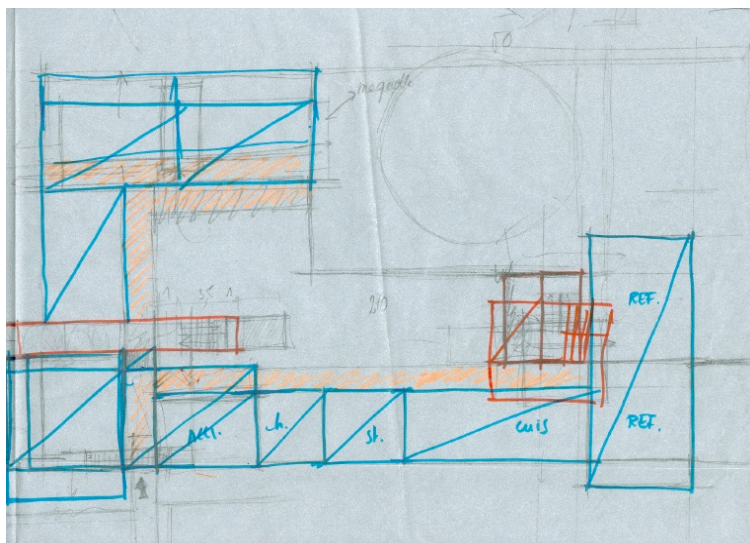


Figure 41

Plan du rez-de-chaussée dans la situation 1. On y voit coexister des traits de brouillon au crayon et des traits de mise au net, aux surligneurs.

3.1.3. Déroulement de l'activité

La figure 42 décrit, sous forme de ligne du temps, le déroulement de l'activité de conception en superposition.

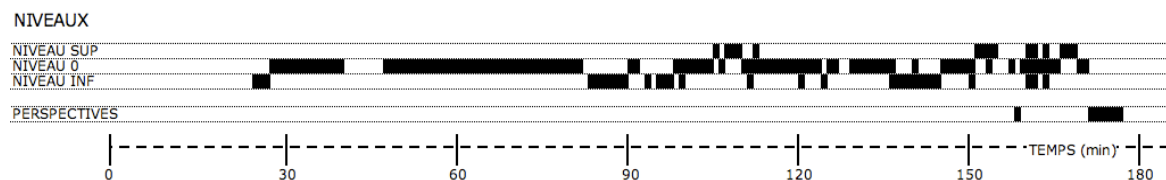


Figure 42

Déroulement de l'activité papier-crayon. A chaque ligne correspond un étage du bâtiment. Le nom des étages est celui donné par le concepteur. La dernière ligne identifie les moments où le concepteur trace des dessins en perspective.

⁵⁸ Notons que c'est le concepteur lui-même qui situe le niveau 0 au-dessus de la marche.

En ce qui concerne la conception en superposition, cette activité s'organise en trois périodes bien distinctes.

- **Un travail sur l'énoncé.** Globalement, on remarque que les productions graphiques des vingt-cinq premières minutes ne concernent aucun des étages. Il s'agit d'une première période au cours de laquelle le concepteur commence par l'annotation de la feuille d'énoncé et par l'organisation des informations relatives au bâtiment, notamment à travers un graphe d'adjacence. Les surfaces de chaque espace sont calculées et l'encombrement total des différents espaces est évalué. Ainsi, le concepteur prépare le travail de simulation graphique en restructurant les contraintes et en se les appropriant.
- **Un travail sur le rez-de-chaussée.** On observe ensuite une longue période de travail exclusivement sur le rez-de-chaussée, jusqu'à la quatre-vingt-cinquième minute environ. Une première esquisse de la forme du bâtiment est créée à partir d'un concept de positionnement autour de l'arbre remarquable. Plusieurs versions de cette esquisse sont produites et corrigées dans cette première étape de conception. Cette formalisation initiale du bâtiment n'est envisagée qu'au niveau du rez-de-chaussée et servira de base à la conception de l'ensemble du bâtiment. Les décisions majeures sur l'agencement des espaces et la disposition du bâtiment sont prises lors de cette période. Une fois l'agencement des principaux espaces décidé, le concepteur réalise un premier plan à l'échelle. Il s'agit d'une mise au net et à l'échelle des esquisses conceptuelles de l'étape précédente. Le travail se termine par une série de décisions concernant le niveau supérieur.
- **Un travail sur les trois niveaux** (minute 86 à la fin de l'activité). On observe ensuite que les dessins produits concernent les trois niveaux jusqu'au terme de l'activité. En fait, le concepteur dessine trois versions de l'ensemble du bâtiment, grâce à un travail en parallèle sur plusieurs plans des étages. Entre chacune de ces versions, les esquisses de la version précédente sont remises au net. Cette mise au net des esquisses a un rôle particulier : chacune des versions du bâtiment démarre par la mise au net de la version précédente. A noter que le concepteur termine son activité par un dessin en perspective du bâtiment afin d'en vérifier sa volumétrie.

On peut donc constater qu'à une période de définition des grandes lignes conceptuelles qui prennent place sur un seul niveau, succède une série d'itérations (trois versions) d'un travail de résolution sur les trois niveaux en parallèle.

3.1.4. Démarche observée

Nous pouvons observer que, tout au long de l'activité, le concepteur procède par bouclage. Régulièrement, il effectue un certain nombre d'essais sur une partie du bâtiment, puis évalue les répercussions des nouveaux éléments sur d'autres parties du bâtiment et sur les autres niveaux préalablement définis. Les changements opérés entraînent l'émergence de nouvelles contraintes à prendre en compte pour la conception des autres parties du bâtiment. Ainsi, il procède à de nombreux allers-retours entre les différentes zones du bâtiment et entre les différents niveaux, principalement dans la seconde moitié de l'activité.

Une fois les lignes majeures du bâtiment planifiées (dans la première moitié de l'activité, c'est-à-dire les deux premières périodes identifiées), les différentes contraintes sont propagées de manière opportuniste : la résolution d'un ensemble de contraintes sur un étage en génère de nouvelles, qui doivent être propagées sur les autres étages. C'est ainsi que l'on constate un travail en parallèle sur les trois niveaux du bâtiment. Il s'agit, à chaque décision, d'en évaluer les conséquences sur les autres étages et de propager les nouvelles contraintes. Ce mécanisme se déroule de la même manière avec les nombreux plans de détail réalisés. Les décisions prises sur ces plans de détail sont reportées par propagation sur les plans d'ensemble.

À des moments clés, le concepteur remet l'ensemble de ses décisions au net sur de nouveaux calques. Ce sont ces calques qui, mis au net, serviront de base à la suite de la conception. Il n'y a

pas de réutilisation des calques et dessins précédents, à l'exception de certaines consultations occasionnelles.

3.2. Situation 2 : Bureau Virtuel et EsQIuse Prototype 1

3.2.1. Outils

Dans cette situation, le concepteur travaille principalement avec le stylo de couleur rouge de la palette graphique. La couleur noire – la seule interprétée par le logiciel – est employée uniquement à des fins de mise au net. La gomme numérique est aussi utilisée sur certains dessins. Le modèle 3D est construit en temps réel et est présent en permanence sur l'espace de travail. Ainsi, dès qu'un trait noir est effectué sur l'espace de dessin, un mur apparaît dans le modèle.

3.2.2. Productions graphiques

On voit rapidement apparaître une distinction entre deux types de dessins, répartis sur des calques spécifiques.

- **Des esquisses de brouillon.** Correspondant aux esquisses de conception observées dans la situation papier-crayon, ces esquisses sont tracées exclusivement en rouge et sont réparties sur des calques particuliers, que nous nommons « calques de brouillons » (figure 43). Ces esquisses sont des lieux privilégiés d'exploration. De nombreux traits, souvent imprécis, se superposent et sont rarement effacés. De nombreuses solutions et concepts coexistent. De nombreuses annotations et dessins de détails sont présents sur ces calques.
- **Des esquisses « propres » et mises au net.** Ces dernières apparaissent plus soignées que les premières. Les traits sont plus droits et plus précis. Chaque trait représente une paroi et chaque paroi est représentée uniquement par un trait. Elles sont toutes présentes sur des calques spécifiques (il en existe un par niveau du bâtiment) et tracées exclusivement en noir (figure 44). Sur ces calques, le concepteur utilise fréquemment la gomme numérique. Ce n'est qu'en fin d'activité que le concepteur annoté ses « calques nets » avec des traits de couleur rouge, principalement pour nommer les espaces définis et pour ajouter des éléments secondaires importants (escaliers, mobilier, etc.). Ces esquisses sont proches des esquisses synthétiques décrites par Leclercq & Elsen (2007) : nombre réduit de traits et peu de variabilité, présence d'annotations. Ces esquisses sont plus « propres » que les précédentes, mais gardent malgré tout un caractère d'imprécision géométrique.

La figure 43 est un exemple de calque de brouillon. La figure 44 montre le calque net de la dernière version du rez-de-chaussée. Le bâtiment comporte quatre niveaux, un sous-sol (au pied de la marche), un rez-de-chaussée et deux niveaux supérieurs. Un bloc central, contenant les classes, sépare la cour de récréation en deux. Les autres fonctions du bâtiment sont situées du côté rue, sur la marche.

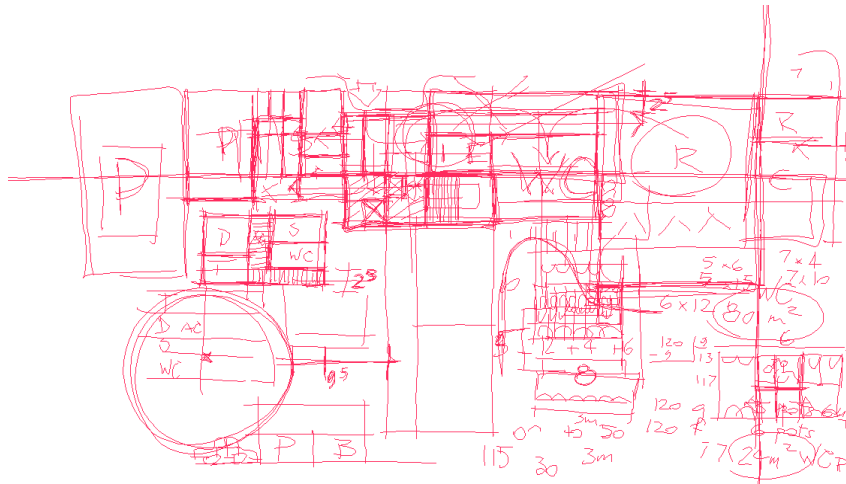


Figure 43

Esquisse numérique du rez-de-chaussée et annotations sur calque « brouillon » dans l'activité Prototype 1. Tous les traits sont dessinés en rouge.

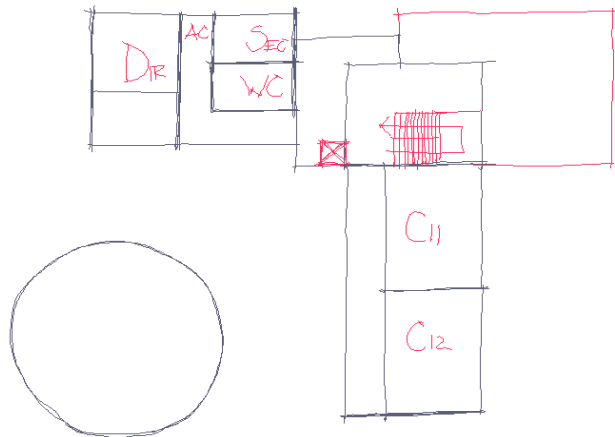


Figure 44

Dernière version du premier étage sur calque « net » dans l'activité Prototype 1. Tous les traits importants sont dessinés en noir, et certaines annotations sont présentes en couleurs.

3.2.3. Déroulement de l'activité

Le déroulement de l'activité de conception en superposition peut être schématisé comme suit (figure 45).

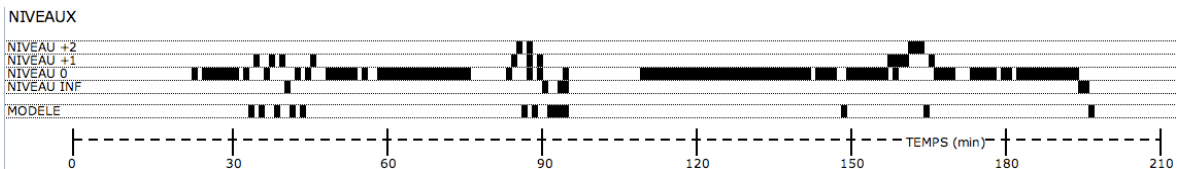


Figure 45

Déroulement de l'activité Prototype 1. Les lignes correspondent aux étages du bâtiment. Le nom des étages est celui donné par le concepteur. La dernière ligne identifie les moments où le concepteur manipule le modèle 3D auto-généré.

Au sein de cette activité se distinguent des périodes de nature différente.

- **Travail sur l'énoncé.** A l'instar de la précédente, cette activité commence, pendant une vingtaine de minutes, par la création d'un support rassemblant les informations pour la structuration et la planification du bâtiment : le calque « fond de plan ». Ce calque est, au départ, une planification de la répartition des surfaces (liste des pièces et des surfaces, graphe d'adjacence, etc.) et sera régulièrement utilisé tout au long de la conception comme aide-mémoire et complété de nouvelles informations. Après la création de ce calque, le concepteur pose sa première hypothèse de répartition des pièces entre les différents étages et détermine la surface au sol du bâtiment.
- **Travail sur le rez-de-chaussée.** La majeure partie de l'activité est un travail sur le rez-de-chaussée. On observe sur la figure 45 quatre périodes de travail, plus ou moins longues, sur le rez-de-chaussée uniquement. C'est lors de ces périodes que prend place l'essentiel du travail de recherche conceptuelle. Les productions graphiques sont exclusivement des dessins de brouillon qui prennent place sur des calques spécifiques. Ces calques sont peu nombreux. Chacune de ces périodes de travail sur le rez-de-chaussée correspond à une nouvelle version du bâtiment.
- **Travail sur tous les niveaux du bâtiment.** À trois reprises, particulièrement visibles sur la figure 45, le concepteur travaille pendant un court instant sur l'ensemble des niveaux du bâtiment. En réalité, le concepteur met au net ses esquisses (avec la couleur noire, interprétée par le logiciel), sur de calques « nets ». Cette mise au net lui permet d'afficher un modèle 3D cohérent. A chacune de ces périodes, il manipule le modèle 3D (ligne « modèle » sur la ligne du temps). A noter que les mêmes calques nets sont conservés et réutilisés durant toute la conception. Ils ne sont ni supprimés ni remplacés, leur contenu est effacé et modifié.

C'est ainsi que se succèdent en plusieurs boucles des périodes de travail sur le rez-de-chaussée et sur l'ensemble des niveaux. Très tôt, le concepteur esquisse la forme du bâtiment en fonction de la surface par étage pour en évaluer l'emprise. Rapidement ensuite, il met au net cette première forme sur les différents calques correspondant aux étages, créant ainsi un modèle 3D complet de la première version de son bâtiment. Il manipule ce modèle 3D en vue d'estimer principalement la pertinence de la localisation du bâtiment dans l'espace disponible sur le site et de vérifier le volume de la structure. Il travaille ensuite longuement sur le rez-de-chaussée avant d'effectuer une mise au net et de manipuler le modèle 3D. Deux autres versions de brouillon du rez-de-chaussée mèneront à des périodes de mise au net sur l'ensemble des niveaux.

3.2.4. Démarche observée

Le concepteur procède aussi par essais et erreurs. Néanmoins, on ne retrouve plus ce mécanisme de propagation de contraintes observé dans l'activité précédente (voir 3.1.4). Ici, les décisions prises sur des calques de brouillon du rez-de-chaussée concernent souvent plusieurs parties du bâtiment, comme la localisation du couloir, similaire dans les différents niveaux. En fait, les contraintes sont toutes esquissées au brouillon sur un calque unique – du rez-de-chaussée – durant les longues périodes de travail sur ce niveau. Ces contraintes ne sont reportées sur l'ensemble du bâtiment qu'aux périodes de travail sur tous les niveaux. Lors de ces périodes, le concepteur redessine sur plusieurs calques « nets » ce qu'il a décidé préalablement sur un seul calque « brouillon ». Dans ces étapes, il n'y a pas à proprement parler de génération d'idées nouvelles. Il apparaît que le concepteur esquisse sur des plans du rez-de-chaussée les informations nécessaires au dessin de l'ensemble des niveaux du bâtiment et qu'il gère toutes les contraintes de la conception sur ce rez-de-chaussée, de manière centralisée. Ce n'est qu'une fois un ensemble de décisions prises qu'il répartit les informations de son calque brouillon sur ses calques nets, et qu'il consulte le modèle 3D afin de vérifier la pertinence de son travail.

3.3. Situation 3 : Bureau Virtuel et EsQIse deuxième version (Prototype 2)

3.3.1. Outils

Les outils utilisés sont les mêmes que dans l'activité précédente : stylos numériques et calques virtuels. Ici aussi, la majorité du travail se fait en couleurs. La couleur noire, interprétée, n'est utilisée qu'à des moments précis et sur des calques particuliers.

3.3.2. Productions graphiques

Comme dans l'activité précédente, on observe ici l'émergence d'une différenciation entre deux types d'esquisses. Des croquis conceptuels, en couleurs, prennent place sur des calques « brouillon » et des esquisses synthétiques, dessinées en noir, sur des calques « nets ». Les annotations en couleurs sur calques « nets » sont cependant plus fréquentes et apparaissent plus tôt dans cette activité que dans la précédente : « *Je vais garder le noir pour quand c'est très important* ».

La figure 46 montre un calque net, avec un calque de brouillon visible en transparence. Dans cette configuration, les dessins nets et de brouillon sont visuellement mêlés, tout en étant inscrits sur des supports différents, les calques spécialisés.

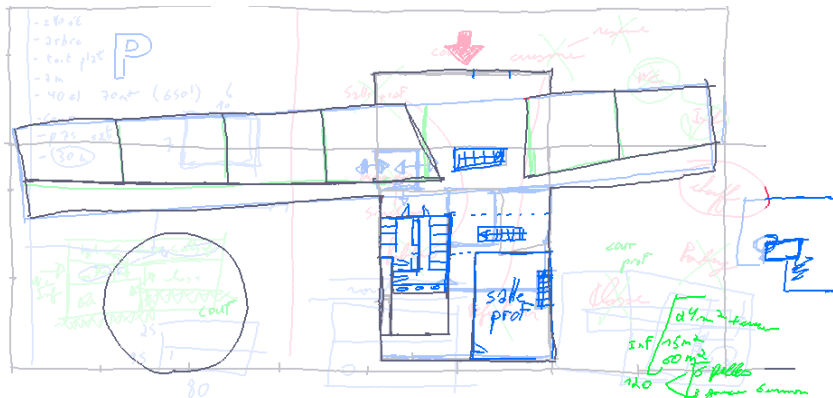


Figure 46

Esquisse numérique du premier étage du bâtiment sur calque 'net' avec un calque 'brouillon' en transparence, dans l'environnement Prototype 2.

Le bâtiment comprend trois niveaux et est constitué d'un bloc central scindant la cour de récréation en deux et comprenant l'ensemble des espaces-fonctions, à l'exception des classes. Ces dernières sont situées dans deux ailes du bâtiment, sur la marche, dans un axe légèrement décentré par rapport à celle-ci. Notons aussi que dans cette activité, le concepteur situe le rez-de-chaussée au pied de la marche du terrain.

3.3.3. Déroulement de l'activité

Le déroulement de cette activité est schématisé dans la figure 47.

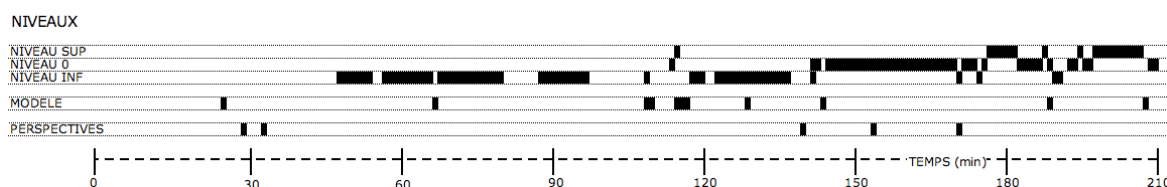


Figure 47

Déroulement de l'activité Prototype 2. Les lignes correspondent aux étages du bâtiment. Le nom des étages est celui donné par le concepteur. Les deux dernières lignes identifient respectivement les moments où le concepteur manipule le modèle 3D auto-généré et les moments où il trace des dessins en perspective.

A nouveau, nous pouvons identifier trois types de périodes.

- **Travail sur l'énoncé et premières ébauches.** Durant la première période (environ 45 minutes), le concepteur s'approprie l'énoncé et structure les informations essentielles sur le calque « fond de plan » qu'il consultera fréquemment durant l'ensemble de l'activité. Ce calque lui servira également d'aide-mémoire pour vérifier l'ensemble des éléments de l'énoncé. Il explore aussi la forme générale du bâtiment, via plusieurs essais en plans et en coupes.
- **Travail sur un seul niveau.** Ici aussi, on distingue trois périodes de travail sur un seul étage. Une longue partie de l'activité concerne un travail sur le rez-de-chaussée. Le concepteur change fréquemment de calque pour résoudre des problèmes spécifiques (alignement de la façade, etc.) à l'aide de représentations alternatives (plans de détails, esquisses simplifiées, coupes, etc.). Le rez-de-chaussée défini, c'est le premier étage qui occupera majoritairement le concepteur (après 135 minutes), principalement pour l'aménagement intérieur de cet espace. Enfin, le deuxième étage sera aménagé, dans une période plus courte, en fin d'activité (de la minute 200 à 210 environ).
- **Travail sur l'ensemble des niveaux.** On retrouve, à l'instar de l'activité Prototype 1, des périodes lors desquelles le concepteur travaille sur tous les niveaux en parallèle. Ici aussi, il dessine sur un calque « net » par niveau du bâtiment. Il met au net, sur tous les étages, ce qu'il a préalablement esquissé sur le calque « brouillon » d'un seul étage. On peut aussi constater que ces périodes sont accompagnées de manipulations du modèle 3D en vue de vérifier le volume.

Dans cette situation, on retrouve donc le même type de déroulement que pour l'activité Prototype 1. La première étape est la structuration de l'énoncé et la détermination de la forme globale du bâtiment. Ensuite, nous pouvons observer de longues périodes de travail sur un niveau (rez-de-chaussée, premier puis deuxième étage), ponctuées de phases de travail sur l'ensemble des niveaux.

Les dessins en perspective sont tracés lors des phases de travail sur un seul niveau, et le modèle 3D est manipulé, comme dans l'activité sur Prototype 1, uniquement lors des phases de travail sur plusieurs niveaux. Il faut toutefois noter que l'on observe une manipulation du modèle 3D assez rapidement (après 25 minutes) dans la première période de travail. Il s'agit pour le concepteur de « voir ce que la machine peut faire ». Cette différence avec Prototype 1 peut s'expliquer par le fait que dans la deuxième version du logiciel, le modèle n'est pas présent en permanence. Le concepteur le regarde donc plus par curiosité que par nécessité pour la conception, comme en témoignent certaines de ses verbalisations spontanées (« je vais essayer de voir si on ne peut pas dessiner en trois dimensions », « c'est joli, je suis émerveillé devant la technique »).

3.3.4. Démarche observée

On observe ici le même type de démarche que dans la situation précédente. Le concepteur réalise des essais et gère les contraintes sur un seul calque d'un seul niveau qui sert ensuite de support à l'ensemble des décisions. Celles-ci sont reportées sur tous les calques et les niveaux via une mise au net à des moments clés, accompagnée d'une visualisation du modèle 3D. Ces périodes de

recherche se basent néanmoins tour à tour sur des niveaux différents. A chaque niveau correspondent des préoccupations particulières : emprise au sol et principes généraux pour le rez-de-chaussée, aménagement intérieur pour le premier étage, et mobilier et finalisation pour le second niveau.

4. Comparaison entre les activités

4.1. Conception en superposition

Il nous apparaît intéressant de comparer le déroulement de l'activité dans ces trois situations afin de mieux cerner le déroulement de la conception du point de vue de la superposition, en fonction de l'environnement dans lequel le concepteur évolue. La figure 48 montre la comparaison du temps de travail sur les niveaux dans les trois activités.

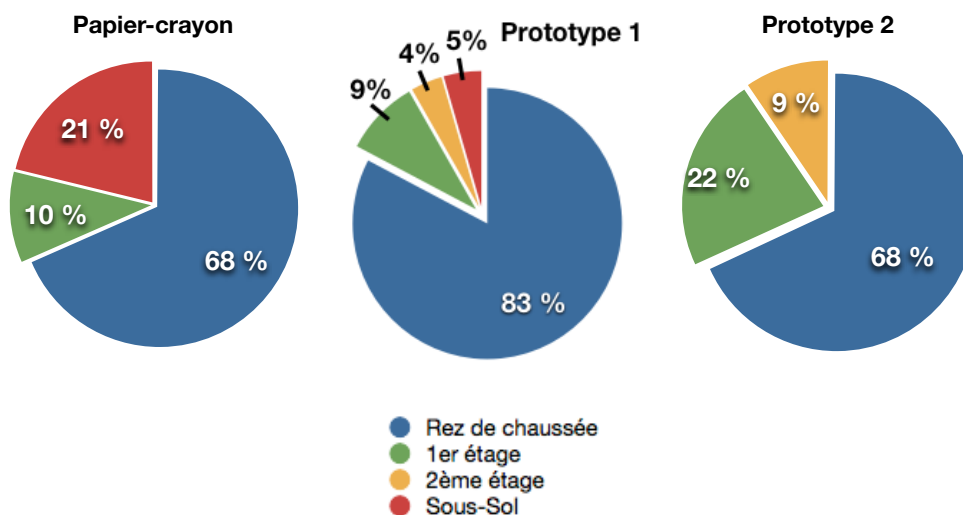


Figure 48
Proportion du temps de travail sur les différents étages du bâtiment.

Pour chaque activité, il existe un « niveau de base », le rez-de-chaussée, sur lequel le concepteur mobilise une grande part de son temps de travail.

La conception de ce niveau de base mobilise plus de temps que les autres car il s'agit de l'étage le plus complexe au point de vue des circulations. En outre, ce niveau de base comprend de nombreuses informations plus ou moins implicites concernant les autres étages : emprise du bâtiment, circulations verticales, structure, etc. Ainsi, les principes du bâtiment sont, dans les trois cas, principalement portés par la conception du rez-de-chaussée. A noter que l'énoncé, une école de six classes sans contraintes trop importantes relatives aux circulations verticales, influence probablement l'apparition de ce niveau de base : il est potentiellement possible de dupliquer l'aménagement intérieur d'un étage sur les autres. Néanmoins, il semble qu'il soit plus simple pour les trois concepteurs de mobiliser l'essentiel de leur travail sur le rez-de-chaussée.

Notons toutefois que ce niveau de base correspond à des réalités différentes : pour les situations papier-crayon et Prototype 1, il s'agit du niveau situé au-dessus du décrochement de terrain, alors

que pour le Prototype 2, cela concerne l'espace situé en-dessous de ce décrochement. Ceci s'explique par la prédominance accordée à l'entrée principale du bâtiment considérée soit au niveau de la rue (au-dessus de la marche), soit au niveau de la cour de récréation (au pied de la marche).

Si l'on se place dans une perspective dynamique, en interrogeant le déroulement temporel de l'activité, nos observations, synthétisées sur les lignes du temps, tendent à montrer une certaine organisation temporelle émergente du travail sur les niveaux, différente dans les trois situations. Globalement, et afin d'y voir plus clair, on peut schématiser le déroulement de ces activités comme suit (Figure 49).

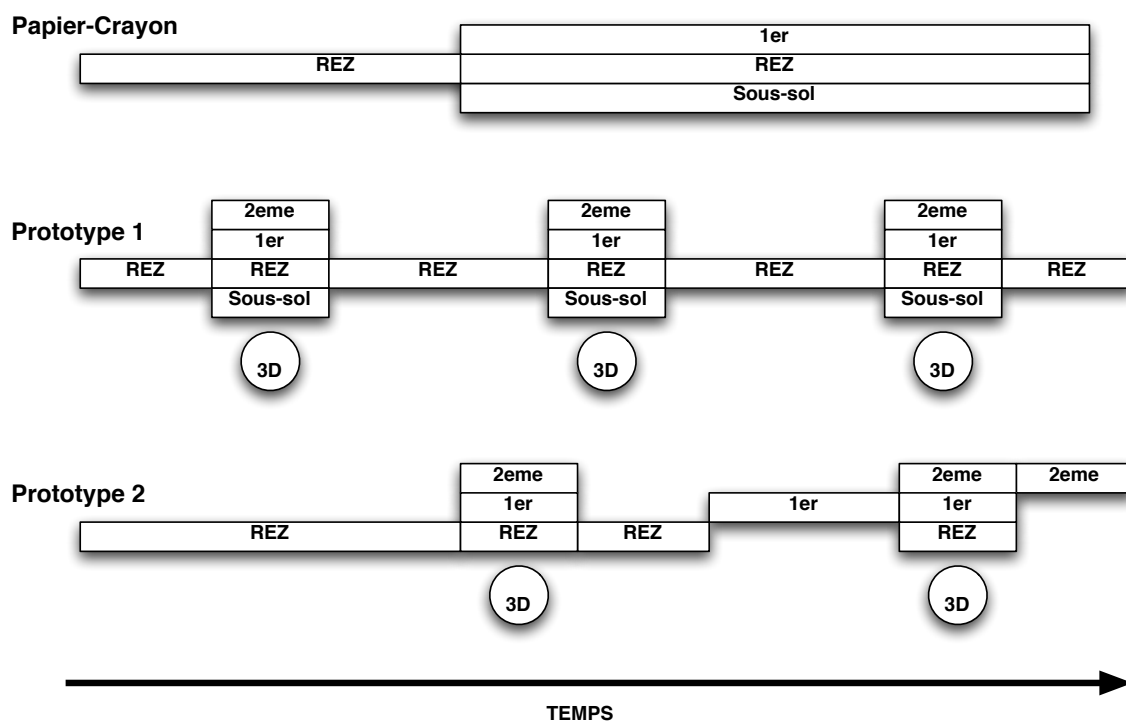


Figure 49

Schémas synthétiques de la dynamique temporelle du travail en superposition dans les trois activités.

Dans l'activité papier-crayon, après un long travail sur le rez-de-chaussée, le concepteur travaille en parallèle sur les différents niveaux. Il utilise plusieurs calques qu'il manipule régulièrement. A deux reprises, il recopie et met au net ses esquisses sur de nouveaux calques, un par niveau, qui serviront de support à la conception d'une nouvelle version de son bâtiment.

L'activité Prototype 1 est caractérisée par un travail se déroulant principalement au niveau du rez-de-chaussée, ponctué de périodes de travail sur tous les niveaux. Les calques concernant le rez-de-chaussée sont régulièrement changés, mais les calques « nets » sont réutilisés. Ainsi, il n'existe qu'une version des étages, qui est modifiée à plusieurs reprises lors de l'activité, notamment à l'aide de la gomme.

Dans l'activité Prototype 2, on constate un enchaînement du travail sur chacun des niveaux individuellement, entrecoupé par des périodes de travail sur tous les niveaux du bâtiment. Ici aussi, les calques nets sont réutilisés.

Sur EsQUIsE, dans ses deux versions, la conception en superposition s'organise autour du modèle tridimensionnel : les périodes de travail sur l'ensemble des niveaux sont systématiquement accompagnées par l'exploration du modèle 3D. Pour aller plus loin, on peut même observer pour Prototype 1 que les périodes de construction du modèle sont les seuls moments de travail sur les étages et le sous-sol. La conception se fait sur le rez-de-chaussée, et les étages ne sont développés que pour la construction du modèle. Le même type de démarche se retrouve pour la deuxième activité. La conception de l'ensemble du bâtiment est réalisée au niveau du rez-de-chaussée et l'aménagement intérieur est effectué séparément sur chacun des étages. Pour les deux activités sur le Bureau Virtuel, il n'existe qu'un seul calque pour les étages et le sous-sol et il s'agit exclusivement de calques « nets ». Par contre, plusieurs calques représentent le rez-de-chaussée, à la fois des calques « nets » et « brouillon ».

Nous pouvons tirer plusieurs conclusions de cette comparaison, afin de mieux cerner la conception en superposition et l'influence sur celle-ci d'un environnement technologique de conception.

- On observe dans les trois activités une similitude concernant l'utilisation d'un niveau de base. En effet, les premières esquisses concernent uniquement un niveau du bâtiment qui, à ce stade, contient l'information nécessaire pour gérer l'emprise du bâtiment dans son ensemble.
- Des mises au net régulières permettent au concepteur d'arrêter un certain nombre de décisions. Le participant sur papier-crayon, lors de ces mises au net, crée des versions supplémentaires des trois niveaux du bâtiment. Dans les deux activités sur EsQUIsE, les mises au net correspondent aux périodes de travail sur l'ensemble des niveaux.
- Dans la situation papier-crayon, l'utilisation de ce niveau de base fait progressivement place à une conception des niveaux en parallèle où le concepteur travaille par bouclages, c'est-à-dire qu'il évalue l'impact de chacune de ses décisions locales sur les autres niveaux, créant de nouvelles contraintes qui devront être résolues. Leur résolution entraînera à son tour la propagation de nouvelles contraintes à traiter sur les autres niveaux. Un processus itératif entre la création de nouvelles contraintes et leur résolution se met en place.
- Par contre, dans les deux activités sur EsQUIsE, la totalité des informations concernant le bâtiment dans son ensemble est esquissée sur les calques « brouillons » du niveau de base. Ces informations sont ponctuellement recopiées sur un calque « net » unique par niveau. Cette mise au net est accompagnée d'une vérification du volume grâce au modèle 3D. Le niveau de base, support aux informations de l'ensemble du bâtiment, continue à être utilisé dans la suite de la conception. La résolution des contraintes liées à la superposition se fait directement sur un seul niveau, et des périodes de mise au net et de vérification, grâce au modèle 3D, prennent place régulièrement.
- Pour la situation Prototype 2 cependant, ce niveau de base évolue au cours du temps. Il s'agit au départ du rez-de-chaussée, puis du premier étage et enfin du deuxième étage. La dynamique reste la même que pour la situation Prototype 1 : ces niveaux seront tour à tour les supports à la résolution des contraintes sur l'ensemble du bâtiment.
- A noter enfin que la proportion du temps de travail sur le rez-de-chaussée, si elle est comparable dans les activités papier-crayon et Prototype 2, est plus importante pour l'activité Prototype 1, bien que ce bâtiment comporte un étage de plus que les autres. Cette organisation centralisée de l'information semble donc être plus prégnante lorsque le modèle est présent en permanence. Elle s'explique probablement par le fait que tout changement de l'ordre des calques dans l'espace de travail et toute modification des dessins nets impliquent automatiquement une modification du modèle et ce, en temps réel. Il est probable que le concepteur, afin de ne pas perturber son action par la présence d'un modèle incohérent, choisisse d'exploiter le moins possible le système.

4.2. Utilisation des coupes, élévations, dessins en perspective et modèle 3D

4.2.1. Occurrence des coupes, élévations et perspectives

Nous avons comptabilisé le nombre de coupes, d'élévations et de dessins en perspective réalisés par les participants dans chacune des activités. Les résultats sont détaillés au tableau 5. Ces résultats nous invitent à plusieurs observations.

Dans la situation Prototype 1, l'activité est caractérisée par l'absence totale de dessins en coupes, élévations et perspective. Il semble que, pour ce concepteur, le modèle 3D contienne les informations nécessaires pour le travail en projection verticale et en volume. Il ne trace donc aucun de ces dessins.

A l'inverse, le concepteur dans la situation Prototype 2, dessine beaucoup de coupes, élévations et perspectives. Même si nous ne pouvons exclure l'hypothèse d'une différence interindividuelle dans l'utilisation de ce type de dessins, nous pouvons interpréter cette observation par le degré de présence du modèle 3D. En effet, dans la situation Prototype 1, le modèle est visuellement présent en permanence pour le concepteur dans une fenêtre de grande taille et ce dernier doit constamment ré-agencer ses calques pour construire un modèle cohérent. Son attention est donc régulièrement portée sur ce modèle et sur la superposition des calques, et donc sur les aspects verticaux de son bâtiment. A l'inverse, dans l'activité Prototype 2, le modèle 3D est présent uniquement sur demande (en affichant la fenêtre 3D). Dès lors, l'utilisation du modèle n'implique pas nécessairement d'allouer de grandes ressources attentionnelles aux aspects verticaux du bâtiment. Il est donc important pour le concepteur de créer des coupes, élévations et dessins en perspective pour traiter des superpositions et des volumes, à l'instar de l'activité prenant place dans l'environnement papier-crayon.

	Papier-crayon	Prototype 1	Prototype 2
Coupes et élévations	8	0	12
Dessins en perspectives	2	0	5

Tableau 5

Occurrence des dessins en coupe, élévation et perspective réalisés par les participants.

4.2.2. Utilisation du modèle 3D et des dessins en perspective

Dans les lignes du temps (figures 42, 45 et 47), il apparaît, pour les deux activités sur EsQIIsE, que chacune des périodes de travail sur l'ensemble des étages est accompagnée par des manipulations du modèle tridimensionnel et que la manipulation du modèle n'intervient que lors de ces périodes de travail sur plusieurs étages (à l'exception d'une exploration des capacités du logiciel, en début d'activité sur Prototype 2). Ces manipulations servent à vérifier la volumétrie du bâtiment. Ainsi, le modèle remplit clairement un rôle d'évaluation.

Si, dans les deux activités sur EsQIIsE, le modèle 3D est utilisé à des fins de vérification lors des périodes de mise au net, dans l'environnement papier-crayon, ce sont les dessins en perspective qui endossent ce rôle de vérification volumique et ce, en fin d'activité. Par contre, dans l'activité

Prototype 2, des dessins en perspective coexistent avec les manipulations du modèle, mais remplissent des fonctions différentes : les dessins en perspective tracés par le concepteur sont utilisés pour exprimer des idées relatives au volume. Il s'agit d'une fonction d'expression différenciée de la fonction de vérification et soutenue par le modèle. Il semble donc que le modèle 3D auto-généré permette une vérification rapide des informations liées au volume du bâtiment, mais n'autorise pas l'expression d'idées volumiques qui prend exclusivement place sur des esquisses, notamment sur des dessins en perspective.

5. Discussion

Nous devons d'abord noter que les différentes conclusions et observations relatées dans cette étude doivent être relativisées : la faible taille de notre échantillon n'exclut pas que les différences observées dans l'usage des dessins, dans les stratégies de conception ou dans les modes d'interaction avec le logiciel soient dues à des « styles de conception » ou des préférences personnelles, plutôt qu'à des influences de l'environnement. Loin de prétendre à une généralisation, la démarche adoptée (approche de recherche qualitative en profondeur avec peu de participants, dans une tâche réaliste mais non écologique) permet néanmoins de mettre en lumière un certain nombre d'éléments de réponses à nos hypothèses et d'inférer des recommandations générales pour le développement de futurs systèmes d'assistance à la conception sur base d'esquisses. La méthode utilisée est également pertinente en regard de l'état de développement du prototype, qui nécessite encore des aménagements ultérieurs avant de pouvoir être utilisé dans un bureau d'architecture.

5.1. Nature des esquisses sur le logiciel EsQUIsE

Un premier élément à noter est relatif à la nature de l'esquisse numérique. Sur EsQUIsE, une différenciation marquée est apparue entre les calques contenant des dessins « brouillons » et ceux contenant des dessins « nets ». Cela contraste avec l'activité papier-crayon où chacun des calques contient conjointement des dessins « brouillons » et des dessins « nets ». Cette différenciation nous semble liée aux contraintes d'usage du logiciel et du modèle 3D, qui impliquent de ne disposer que d'un calque « net » par niveau avec des traits noirs interprétés et de dessiner précautionneusement sur ces calques afin de faciliter leur interprétation par le logiciel. Néanmoins, elle met en lumière la distinction entre deux types de productions graphiques dans l'étape créative de recherche conceptuelle du projet architectural.

- **L'esquisse conceptuelle.** Il est nécessaire pour l'architecte de disposer d'outils de conception autorisant une recherche souple et non limitative (Lebahar, 1983). Telle est la fonction des dessins « brouillons » spontanément créés par les concepteurs. Ces dessins sont caractérisés par un haut degré d'ambiguïté et de personnalisation ainsi que par une multiplication des solutions graphiques au problème architectural qui rendent ardue voire impossible leur communication à autrui. Ici, c'est le trait qui prédomine. L'exploration graphique aboutit à une large collection de traits, de laquelle émerge l'élément architectural. On ne peut établir un lien univoque entre ce dernier et la trace graphique qui le compose. Dans EsQUIsE, ces esquisses de simulation sont dessinées exclusivement en couleurs et sur des calques distincts (afin d'éviter leur interprétation par le logiciel qui se traduirait par des incohérences dans le modèle 3D : étage excédentaire, murs dédoublés, etc.).

- **L'esquisse synthétique.** Elle est issue d'activités régulières de mises au net. La solution représentée est unique et émerge d'un choix de traits structurants parmi un nombre important de traits présents dans les esquisses conceptuelles. Le dessin est moins ambigu et plus conventionnel que pour ces dernières. Chaque frontière (mur, paroi vitrée, etc.) est représentée par un trait unique et ces frontières servent à circonscrire des espaces différenciés. Le choix du trait signifiant lors de la mise au net permet d'arrêter l'agencement des différents espaces. Les quelques annotations textuelles servent exclusivement à nommer les espaces (classe, réfectoire, etc.). Ici, c'est donc l'agencement des espaces qui prédomine. L'esquisse synthétique est en grande partie interprétable par un autre architecte. Dans la situation sur le logiciel EsQUIsE, ces esquisses n'apparaissent que sur des calques au net et sont dessinées en noir (et donc sujettes à leur interprétation par le logiciel). En outre, alors qu'il existe plusieurs versions successives dans la situation « papier-crayon », une seule version (pour chacun des niveaux) est régulièrement modifiée (effacée en partie puis redessinée).

Sur papier-crayon, ces deux types de dessins existent aussi mais sont mêlés et se succèdent : l'esquisse conceptuelle est mise au net en esquisse synthétique qui, à son tour, sert de base à une esquisse conceptuelle. Dans EsQUIsE, ils sont clairement distincts et prennent place sur des calques différents. Ceci nous amène à plusieurs conclusions.

Premièrement, EsQUIsE et le Bureau Virtuel semblent capables d'accueillir l'ensemble des types de dessins de la phase préliminaire, tant les dessins très personnels pour l'exploration graphique que des dessins plus conventionnels pour le dialogue homme-machine. Néanmoins, les contraintes propres à l'esquisse numérique invitent les concepteurs à séparer ces deux types de dessins sur des supports différents. En effet, s'il est tout-à-fait possible de les faire coexister sur des mêmes calques (les dessins de brouillon en couleur et les dessins nets en noir), cette stratégie n'est mise en place par aucun des concepteurs sur EsQUIsE. Il semble que les caractéristiques graphiques des traits sur l'environnement numérique invitent les utilisateurs à séparer ces dessins. En effet, les traits noirs ne sont pas plus marqués que les traits de couleur dans le logiciel. Ils peuvent donc visuellement disparaître s'ils sont recouverts par une multitude de traits de couleur. De plus, le comportement de la gomme, effaçant tous les traits sur son passage, pourrait amener à de nombreuses erreurs en cas de modification d'une esquisse comprenant de nombreux traits (comme les esquisses de brouillon), en supprimant plus de traits que désiré. Afin de garder un maximum de visibilité et de permettre les modifications des dessins nets sans risquer de détruire les dessins de brouillon, les concepteurs préfèrent séparer ces deux types de croquis.

Deuxièmement, cette étude montre clairement que ces deux types de dessins, identifiés par ailleurs par Leclercq & Elsen (2007), existent en tant qu'entités indépendantes dans la conception et remplissent des fonctions différentes. Ainsi, il n'existe pas une « esquisse de conception » mais plusieurs de ces esquisses. Les esquisses conceptuelles sont les premiers dessins, propres au concepteur. Les croquis synthétiques sont une deuxième classe de dessins, intervenant plus tard dans le processus, et coexistant avec les premières. Les plans nets sont une troisième catégorie, qui ne peut intervenir que lorsque l'objet architectural est entièrement (ou à peu près) défini. Les oppositions classiques entre les plans nets et les croquis devraient donc, de notre point de vue, s'enrichir de cette distinction entre croquis synthétiques et conceptuels.

Troisièmement, ces observations permettent de mettre en avant une phase essentielle dans la conception architecturale : la mise au net qui accompagne les transformations des esquisses conceptuelles en esquisses synthétiques. Il apparaît que la mise au net n'est pas un simple recopiage d'éléments du dessin mais bien un changement de représentation : l'architecte passe d'une représentation basée sur des traits à une représentation basée sur des espaces, typiques du métier d'architecte. Cette activité sera l'objet de la deuxième étude de ce travail.

5.2. Un dialogue avec la machine maîtrisé

Il nous semble que cette différenciation entre les esquisses conceptuelles et synthétiques soit tout sauf anodine. A l'origine, le logiciel EsQUIsE était conçu avec l'idée de laisser travailler le concepteur librement, de suivre son activité, de s'adapter et de comprendre ses intentions. C'est le concept de l'« interface absente » conceptualisé dans le cadre du développement de ce prototype (Leclercq & Juchmes, 2002 ; Leclercq 2004, 2005). Ainsi, dans la philosophie du système, l'architecte est invité à dessiner en noir, de façon à ce que son trait soit interprété, et à accompagner éventuellement son dessin d'annotations en couleurs non interprétées.

Pourtant, l'observation de l'activité montre qu'au contraire, l'essentiel du travail se fait en couleurs, et que seule une faible quantité des dessins est interprétée. Cette observation, qui remet en cause les fondements mêmes des modes d'interaction homme-machine envisagés dans le logiciel, nous semble liée à deux éléments.

D'une part, l'esquisse conceptuelle est trop ambiguë pour être sujette à interprétation de la part d'un logiciel. La coexistence de plusieurs solutions et l'extrême imprécision des traits rendent impossible sa compréhension par un agent extérieur, qu'il soit humain ou informatique. L'esquisse synthétique par contre est aisément compréhensible. De ce fait, les utilisateurs tendent à dialoguer avec la machine uniquement au travers des dessins synthétiques.

D'autre part, il semblerait qu'il y ait de la part du concepteur une volonté de « se cacher » du logiciel. Spontanément, et sans consigne spécifique, les deux étudiants observés démarrent l'activité de dessin par des traits de couleur, non interprétés. C'est-à-dire qu'ils choisissent délibérément de tracer des dessins qui ne seront pas utilisés par EsQUIsE. Il nous semble que dans des étapes de création préliminaires, parfois très déstructurées, les concepteurs ne souhaitent pas être en interaction avec une interprétation de leurs pensées émergentes. Dès lors, ils prennent l'initiative et imposent à la machine les modalités du dialogue en décidant, par l'intermédiaire de l'usage du stylo noir, où et quand les externalisations de leur pensée doivent être utilisées par le logiciel. Ce détournement de l'outil leur permet d'adopter une démarche explicite de dialogue avec la machine, correspondant sans doute plus aux modes de travail habituels des concepteurs.

5.3. Organisation émergente de la conception en superposition

A notre connaissance, cette étude est une des premières à interroger les modalités et stratégies de conception en superposition. Nos observations mettent en lumière plusieurs démarches, largement influencées par le dispositif. Si globalement, on constate l'utilisation préférentielle d'un niveau pour concevoir l'ensemble du bâtiment, on peut néanmoins observer des différences dans la suite de l'activité.

- Dans la première situation (papier-crayon), l'activité est basée sur une propagation des contraintes engendrée par des décisions locales sur chacun des niveaux dans un processus itératif. Ainsi, les différents niveaux sont conçus en parallèle. Une décision sur un des étages engendre des répercussions sur les autres étages, qui sont reportées par propagation de contraintes.
- Sur EsQUIsE, l'activité s'articule autour d'une succession de deux types de périodes : des périodes d'exploration sur calque de brouillon avec une esquisse comprenant les informations relatives à tous les étages ; et des périodes de prise de décision consistant à sélectionner les informations pertinentes, à les recopier sur chacun des étages et à procéder à une évaluation de la solution actuelle via le modèle 3D. On voit donc émerger une distinction entre des périodes de

conception exploratoire et des périodes de prise de décision d'ensemble (mise au net) et d'évaluation.

Les activités de génération et d'évaluation de solutions - en ce qui concerne la conception des niveaux les uns par rapport aux autres - ne se succèdent donc pas de la même manière. Alors qu'elles sont intrinsèquement mêlées dans les activités papier-crayon (telles qu'observées ici mais également dans de nombreuses autres études sur la conception, voir notamment Visser, 2006 ou Darses, 2004), l'utilisation d'EsQUIsE génère des phases d'évaluation spécifiques, lors desquelles le modèle 3D est utilisé explicitement par les concepteurs pour évaluer la volumétrie du bâtiment, à des moments clés.

Néanmoins, à ce stade, il nous semble délicat d'affirmer que cette différenciation dans le déroulement des activités de conception est entièrement induite par l'environnement. Elle pourrait aussi émaner en tout ou en partie de deux « styles de conception » différents. Il y a aussi de fortes raisons de penser que les contraintes imposées pour l'exercice (toitures plates et niveaux de hauteur uniforme, contraintes nécessaires pour permettre l'utilisation d'EsQUIsE), jouent un rôle dans la mise en place de ces stratégies. Il est en effet rendu possible voire encouragé par l'énoncé d'adopter une stratégie centralisée de conception en superposition. En outre, il est difficile de pouvoir juger du caractère efficace ou perturbant de cette structuration de l'activité et de cette aide externe.

5.4. Usage de la 3D

Nos observations tendent aussi à montrer que le modèle 3D, construit en temps réel, occupe une place importante dans l'activité en regard des autres types de représentations que sont les coupes, élévations et dessins en perspective. En effet, outre le fait que ce modèle soit utilisé à des moments-clés, il semble, pour l'activité Prototype 1, qu'il tende à suppléer entièrement l'utilisation de ces autres types de productions graphiques (ce qui n'est pas le cas pour l'activité Prototype 2). Bien que nous ne puissions en tirer de conclusions définitives, cette question importante d'un remplacement du dessin en perspective par une visualisation tridimensionnelle auto-générée, suppose que le modèle 3D remplisse un certain nombre de fonctions de ces dessins en perspective. Or, ces derniers répondent à deux finalités : la vérification volumique (activité papier-crayon) et l'expression d'idées en volume (activité Prototype 2) en d'autres termes, des activités d'évaluation et de génération.

Quelles sont dès lors les fonctions de l'usage du modèle 3D ? S'il ne permet pas l'expression immédiate des idées (n'étant pas directement modifiable), le modèle 3D s'avère être un outil puissant de vérification volumique pour l'architecte. En effet, la 3D est utilisée à des moments charnières de l'activité, lorsque le concepteur a pris un certain nombre de décisions sur tous les niveaux de son bâtiment et les a retranscrites sur ses calques « nets ». Le concepteur parcourt le modèle 3D durant ces périodes afin de vérifier la cohérence de l'ensemble du bâtiment. La 3D apparaît donc comme un moyen efficace d'évaluation volumique, permettant un certain nombre d'itérations et de vérifications rapides dans les phases précoces de la conception, ce qui correspond à l'objectif sous-tendant son développement.

Néanmoins, le fait que ce modèle soit généré automatiquement et électroniquement pose la question de l'acte de tracer et, par là, de l'externalisation de la pensée. Tout en dessinant, le concepteur réfléchit à ce qu'il représente, il construit des hypothèses, explore des possibilités et, de cette interaction, émergent de nouvelles idées (Goldschmidt, 2003). Attribuer une caractéristique visuo-spatiale nouvelle à un élément dessiné par le concepteur ou généré par un

logiciel est-il fondamentalement semblable ? Le retour et l'aide apportée par la 3D offrent-ils les conditions de l'émergence de découvertes inattendues ?

De plus, il existe peut-être un risque de voir disparaître les dessins en perspective par la présence d'un modèle auto-généré. Or, si la 3D semble être une ressource efficace pour les activités évaluatives, elle ne permet cependant que de soutenir des évaluations post-exécutives, c'est-à-dire prenant place après que l'ensemble des décisions aient été prises (au moment où les dessins sont mis au net et où le modèle est cohérent). Mais la conception mobilise aussi des évaluations anticipatives pour anticiper les conséquences des actions ou détecter les erreurs (voir chapitre 2, section 2.6). L'absence de tracé de coupes, élévations et perspectives observée dans la situation Prototype 1 est de ce point de vue potentiellement dommageable : une part de la réflexion sur la superposition passe vraisemblablement par le tracé de telles représentations. De plus, cette disparition potentielle de certaines productions graphiques pose la question du processus créatif. Les mêmes processus de la pensée créative sont-ils rendus possibles par un modèle construit automatiquement ?

L'importance de ce questionnement, pour le développement d'outils d'aide à la conception préliminaire, doit cependant être relativisé. En effet, le dessin en perspective, en comparaison avec le dessin en plan, n'est pas un support privilégié d'expression dans les phases précoces de la conception (Leclercq, 1994, évalue la quantité de dessins en perspective à environ 5% de la production graphique des concepteurs en phase préliminaire). De plus, l'existence du modèle, du moins quand il est présent sur demande, n'empêche pas la production de dessins en perspective.

En outre, si l'utilité de ce modèle 3D en tant qu'aide à l'évaluation de la volumétrie du bâtiment semble être importante pour les étudiants, d'autres études avec le même logiciel, le même type d'exercice mais en contexte professionnel (Mayeur, Darses & Leclercq, 2007a, 2007b ; Leclercq, Mayeur & Darses, 2007), nous invitent à relativiser cette utilité. Dans ces études, les auteurs concluent que les architectes professionnels ne sont pas réellement intéressés par le modèle 3D, si ce n'est pour la démonstration technologique, et qu'ils ressentent même une certaine frustration à son usage. Ceci n'est pas surprenant dans la mesure où les architectes experts sont bien plus habitués à manipuler mentalement une image en trois dimensions sur base de plans en deux dimensions. La 3D, pour eux, implique plus de contraintes qu'une réelle utilité. Cette idée peut être mise en relation avec les observations de Blavier (2006) dans le domaine de la perception 2D et 3D dans la chirurgie robotique : les experts arrivent à compenser les difficultés dues à un manque de perception 3D.

Par contre, pour les étudiants, cette nouvelle forme de représentation semble être un atout dans leur conception, leur permettant de changer de point de vue et d'évaluer leur travail sous un autre angle, parfois surprenant.

5.5. Influence des modalités de construction du modèle 3D sur l'activité de conception

Au regard des observations précédentes, il apparaît clairement que le modèle tridimensionnel revêt un aspect structurant pour le déroulement de l'activité de conception, notamment les stratégies de gestion de la superposition. Les contraintes liées à l'existence d'un modèle 3D ne conditionnent plus uniquement les modalités d'interactions propres à son usage. Elles fournissent un ensemble de règles implicites, qui structurent l'entièreté de l'activité de conception et incitent à une démarche différente.

D'une part, la succession de périodes de travail sur un calque « brouillon » d'un niveau de base, et de périodes de travail sur plusieurs calques « nets » de l'ensemble des niveaux, semble être en partie guidée par la présence en temps réel du modèle 3D. En effet, pour utiliser le modèle 3D, il est nécessaire d'avoir des calques relativement « propres » pour permettre la reconnaissance des dessins par EsQUiSE. Seuls les traits noirs sont interprétés. Spontanément, on observe donc une spécialisation des calques, certains contenant ces dessins « propres » en noir et d'autres contenant les esquisses plus « conceptuelles » en couleurs.

D'autre part, cette répartition des esquisses sur des calques entraîne à son tour la démarche de conception en superposition observée. En effet, la multiplication des itérations sur plusieurs calques est incompatible avec une interprétation cohérente et une maquette 3D utile. Pour obtenir un modèle 3D cohérent et profiter de son apport pour l'évaluation, il est en effet préférable de mettre au net tous les niveaux au même moment. Ainsi, on observe que l'ensemble de la recherche graphique et conceptuelle prend place dans des périodes de travail sur un niveau unique, le niveau de base. Quant à la mise au net de tous les niveaux, elle se fait au même moment, dans des périodes régulières qui sont accompagnées d'une utilisation du modèle 3D. Cette démarche de conception par boucle de travail sur un étage de base puis sur l'ensemble des niveaux, semble être en partie guidée par les modalités d'interaction inhérentes à la construction du modèle 3D. Le modèle devient un élément central qui semble occuper toute la réflexion en superposition et ce, au détriment de la production d'autres types de représentations telles que les coupes, élévations ou perspectives.

Ce mode de conception en superposition, et la gestion particulière des contraintes qui en découle, peut aussi être compris comme une volonté du concepteur de pallier aux limites imposées par le modèle 3D pour l'évaluation de ses solutions. En effet, comme évoqué au point précédent, le modèle ne peut être utilisé que pour effectuer des évaluations post-exécutives, et les règles sous-tendant sa construction impliquent que ce modèle ne peut être modifié de façon immédiate, empêchant l'adoption de démarches récursives et itératives avec ce modèle. Il ne permet donc pas de soutenir les évaluations anticipatives des conséquences des choix de conception. Il semble que les étudiants pallient à ce problème d'anticipation en mettant en place des stratégies spécifiques : ils centralisent les contraintes sur leurs calques de brouillon, et effectuent de nombreuses évaluations anticipatives sur leurs esquisses conceptuelles. L'exécution des décisions se fait à des moments spécifiques que sont les phases de mise au net sur les esquisses synthétiques, qui permettent une détection basée sur l'action. Les concepteurs peuvent ensuite procéder à des évaluations post-exécutives avec le modèle. Dans la conception sur papier-crayon, ces évaluations sont plus imbriquées les unes aux autres : les conséquences d'un choix de conception sont directement évaluées sur les autres parties du bâtiment, notamment sur les autres étages, en témoigne la conception des étages en parallèle observée. De la sorte, les utilisateurs du prototype EsQUiSE maîtrisent l'aspect évolutif du contexte en prenant toutes les décisions sur le même dessin, puis en arrêtant ces décisions sur des représentations externes « fixes » que sont les esquisses synthétiques,

Il est cependant difficile de statuer sur la valence de ces règles externes, amenées par l'environnement d'esquisses numériques et la 3D auto-générée. Rien ne nous permet à ce stade d'affirmer qu'une stratégie de composition en superposition est meilleure que l'autre, ou de penser que faire émerger des étapes d'évaluation est négatif ou positif pour la conception, même si nous pensons cependant qu'elle devrait avoir un impact bénéfique pour l'évaluation des solutions et la détection des erreurs, en forçant à un certain, systématisme dans l'évaluation.

5.6. Evaluation des usages : vers d'autres modes d'interaction avec l'esquisse numérique

Plusieurs éléments ressortent de cette étude, relatifs à l'usage du logiciel d'esquisse numérique, et influencent son développement. Comme nous l'avons déjà évoqué, la force du papier-crayon tient en sa totale liberté d'expressivité, son immédiateté, et implique donc un très faible coût cognitif (Goldschmidt, 2003). Mais l'utilisation du stylo électronique permet l'implémentation d'augmentations du dessin liées au papier numérique ou à l'interprétation de croquis. L'objectif des dispositifs d'esquisse numérique doit être de maximiser le rapport entre le coût du dessin numérique et les bénéfices des augmentations. Plusieurs propositions peuvent être faites à cet égard.

Tout d'abord, il semble que l'utilisateur choisisse spontanément d'explicitier ce qu'il veut que la machine comprenne (en ne traçant qu'une partie de ses esquisses en noir - les esquisses synthétiques). Dès lors, nous pensons qu'il est préférable de créer des outils adaptés à cette forme d'explicitation plutôt que de tenter de comprendre à tout prix l'ensemble des dessins. Nous pensons donc que le modèle du « tout-interprété » est quelque peu illusoire pour l'esquisse numérique. En effet, si l'objectif est d'interpréter les esquisses de conception, nous pensons que l'esquisse conceptuelle est, et doit rester, personnelle. Son caractère trop ambigu et son idiosyncrasie rendent son interprétation par un logiciel extrêmement difficile. Par contre, l'esquisse au net, l'esquisse synthétique, est parfaitement interprétable et contient toute l'information nécessaire pour former le modèle du bâtiment. Il convient donc, de notre point de vue, de laisser la maîtrise du dialogue à l'utilisateur pour qu'il puisse décider quels éléments il souhaite voir le logiciel interpréter.

Deuxièmement, la présence permanente du modèle 3D lors de la conception semble avoir un impact bien plus important que lorsqu'elle est « callable » sur demande. Alors que l'objectif du logiciel est de laisser une totale liberté à son utilisateur sans que son activité soit interrompue par le logiciel, il semblerait qu'au contraire, le modèle 3D crée des interruptions. Lorsqu'il est présent en permanence, l'activité de conception est presque entièrement structurée par sa présence. De nouveau, dans l'optique d'une interface invisible, il nous semble nécessaire de « rendre la main » à l'utilisateur. Celui-ci doit pouvoir décider quand il souhaite solliciter des représentations alternatives de l'objet.

Troisièmement, les caractéristiques graphiques des traits sur EsQUIsE, et notamment leur manque de variété et le comportement particulier de la gomme, rendent nécessaire pour le concepteur la séparation des croquis conceptuels et des croquis synthétiques et ce, à des fins de clarté. Il convient donc aussi de travailler sur le rendu visuel des dessins pour favoriser l'expressivité et la flexibilité dans les modes d'externalisation.

6. Conclusions de la première étude

Cette première étude permet de discuter de nos deux premières hypothèses.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

Cette hypothèse semble validée au vu de nos premiers résultats. Les contraintes graphiques des esquisses numériques impliquent plusieurs modifications du dessin. La plus importante est la séparation des esquisses synthétiques et conceptuelles sur des supports différents, contrairement au papier crayon. La deuxième étude de ce travail vise à approfondir l'identification de ces modifications.

Hypothèse 2 : les représentations générées automatiquement par un logiciel ont un impact structurant sur l'activité.

Dans cette étude, c'est surtout cette hypothèse qui a été éprouvée. Très clairement, la représentation externe auto-générée a un impact important, voire structurant, sur la conception. Celle-ci s'organise autour du modèle. En effet, le concepteur est contraint de séparer nettement les esquisses interprétées des esquisses de brouillon afin de disposer à tous moments d'un modèle 3D cohérent, car la construction de ce modèle dépend de certaines règles implicites : disposer d'esquisses relativement propres et avoir un unique plan par étage. Ce modèle 3D influence aussi la façon dont le concepteur organise son activité, et principalement la manière avec laquelle il conçoit les différents étages les uns par rapport aux autres. Ce découplage très net en une esquisse de brouillon et plusieurs esquisses synthétiques invite le concepteur à organiser la génération de solutions uniquement sur les croquis d'un étage de base, contenant l'information relative à tous les niveaux. C'est ensuite, à des moments spécifiques, qu'il évalue l'ensemble du contenu de son esquisse et qu'il intègre ses décisions en modifiant des croquis synthétiques préalables.

Dans l'étude suivante, nous approfondissons ces observations en adoptant une démarche plus systématique de comparaison, en approfondissant l'analyse graphique des dessins et en investiguant plus particulièrement l'activité de mise au net de dessins.

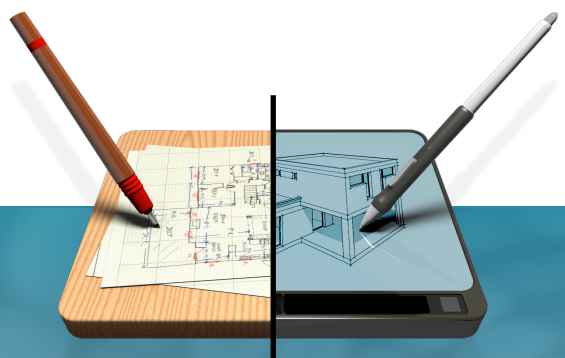
Dans cette étude, nous avons tenté de comprendre, d'une part dans quelle mesure un système de nouvelle génération basé sur l'esquisse numérique fournit une aide à la conception architecturale et, d'autre part, quelles transformations de l'activité peuvent être anticipées. Notre étude consiste en la comparaison de l'activité de conception architecturale préliminaire de trois étudiants architectes dans une situation papier-crayon et dans deux situations outillées par des versions différentes du logiciel EsQUisE affichant un modèle 3D sur base de l'interprétation des esquisses des concepteurs. Nos observations montrent :

- qu'il existe deux types d'esquisses en conception créative : l'esquisse conceptuelle, pour la simulation, et l'esquisse synthétique, pour la précision et le choix ;*
- que la présence d'un modèle 3D auto-généré fournit une ressource pour l'évaluation de la conception, principalement des volumes du bâtiment ;*
- que l'environnement d'EsQUisE, par ses contraintes d'utilisation, implique des modifications dans la nature des représentations créées par l'architecte. Les dessins conceptuels et les dessins synthétiques sont tracés sur des supports différenciés ;*
- que la présence du modèle 3D prend une place importante dans le processus de conception. Elle structure les modalités de propagation de contraintes et la temporalité des choix de conception ;*
- qu'il existe différentes démarches de « conception en superposition » qui sont en partie dictées par l'environnement de conception.*

Au vu de nos hypothèses de travail, cette première étude montre que les contraintes du dessin numérique et la présence d'une interprétation changent la nature du processus de conception. Celui-ci s'organise autour de l'interprétation et de la représentation 3D alternative et des règles nécessaires à sa construction.

CHAPITRE 5

*Deuxième Etude
Influence du dispositif d'esquisse numérique et
de l'interprétation de croquis sur l'activité
graphique en tâche de conception*



1. Introduction

Cette étude⁵⁹ prend comme point de départ les résultats de la précédente. Deux éléments attirent particulièrement notre attention.

- L'identification d'une différenciation fonctionnelle et graphique entre des dessins « nets » et des dessins « brouillons » dans les activités de conception architecturale. Alors que les deux types de dessins ont été identifiés aussi bien dans un environnement numérique que sur papier-crayon, les modalités de leur construction n'ont pas été étudiées en détail. Notre objectif est d'avancer dans la compréhension de la dynamique de cette construction graphique afin de mieux comprendre les enjeux, les coûts et les contraintes de l'interaction au stylo numérique pour le dessin d'architecte.
- L'influence de la représentation auto-générée sur l'organisation de l'activité de conception. L'étude précédente nous renseigne sur le fait que l'utilisation d'EsQUIsE modifie l'activité de conception. Nous souhaitons comprendre plus en profondeur ces influences. En particulier, la différenciation entre les dessins, leur répartition sur des calques différents et les modalités de mise au net particulières observées dans la première étude sont-elles dues à l'interprétation de l'esquisse, à la présence d'un modèle 3D, aux contraintes particulières du stylo numérique et de la palette graphique ou aux propriétés des calques numériques?

Cette étude se situe dans la continuité de la précédente et vise à approfondir les réponses apportées aux deux premières hypothèses de ce travail.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

Hypothèse 2 : les représentations générées automatiquement par un logiciel ont un impact structurant sur l'activité.

Pour ce faire, nous nous intéressons principalement à l'activité de dessin et à l'activité de mise au net. Nous adressons trois classes de questions.

Premièrement, nous cherchons à identifier l'impact d'un environnement numérique sur les caractéristiques graphiques des dessins d'architecture en phase préliminaire de conception. Si la différenciation fonctionnelle entre les esquisses conceptuelles et les esquisses synthétiques apparaît flagrante dans l'étude précédente, nous cherchons à identifier plus en profondeur l'impact du stylo électronique et des contraintes propres aux environnements d'esquisse numérique sur les modes de dessin. Les environnements informatiques de dessin permettent-ils la même richesse d'expression que les outils traditionnels ? Les contenus des croquis sont-ils fondamentalement différents dans ces environnements ? La façon dont les différents dessins sont répartis sur les supports – papiers réels ou feuilles virtuelles – est-elle conditionnée ou influencée par l'outil ?

Hypothèse 1

Deuxièmement, nous cherchons à approfondir la description de l'influence du dispositif technologique sur le processus de pré-conception architecturale : en quoi l'environnement

⁵⁹ Cette étude a aussi fait l'objet d'une soumission dans une revue. Celle-ci a été acceptée pour publication dans le Journal d'Interaction Personne-Système (Safin, Juchmes & Leclercq, *in press*).

numérique transforme-t-il la façon dont l'activité de dessin est structurée ? Notamment, nous nous intéressons dans cette étude à l'utilisation des supports de dessin, c'est-à-dire des calques virtuels, en comparaison aux feuilles de papier réelles. Ces calques virtuels possèdent des avantages propres, les différentes augmentations du papier numérique évoquées au chapitre 3, point 1.3.1 (possibilité de zoom, superposition immédiate et parfaite, etc.), mais aussi des limitations particulières (impossibilité de bouger les dessins les uns par rapport aux autres, intangibilité des supports ou encore gestion de la superposition via une interface spécifique). En tant qu'objets virtuels, les calques numériques ne sont pas soumis aux mêmes lois que les papiers réels (Mackay & Fayard, 1999) et les métaphores du papier virtuel doivent être adaptées au contexte de leur utilisation (Boulanger, Safin & Leclercq, 2005). Ils contiennent donc des contraintes propres à leur utilisation. En quoi l'utilisation de calques virtuels - avec leurs propriétés particulières - modifie-t-elle la succession des dessins et leur répartition ? Nous voulons aussi comprendre le rôle de l'interprétation automatique de croquis par un logiciel dans le déroulement de l'activité. Pour ces questions, et en vue d'approfondir nos résultats précédents, nous cherchons à distinguer les influences propres à l'environnement de croquis numériques de celles qui sont induites par la présence d'une interprétation des dessins par la machine.

Hypothèse 2

Troisièmement, nous nous intéressons aux comportements et activités cognitives mis en jeu dans ce qui est appelé habituellement la « mise au net de dessins », caractéristique de la conception architecturale : nous nous posons la question des mécanismes sous-tendant le passage d'une représentation de brouillon (esquisse conceptuelle) vers un dessin net (esquisse synthétique). En effet, alors que les deux types de dessins sont observables et comparables dans les environnements numériques de croquis et sur papier, les modalités de leur construction peuvent être très variables. Si de nombreuses approches ont décrit la succession des dessins, en fonction de leur degré de complexité (Rodgers *et al.*, 2000), des types de transformations du projet (Goel, 1995) ou encore des liens qu'entretiennent les différents dessins entre eux (McCall *et al.*, 2001), ces études décrivent principalement les liens entre les dessins dans une approche statique. Nous cherchons à adresser ces questions de succession de croquis dans une approche dynamique, c'est-à-dire en observant les activités cognitives impliquées dans le processus de mise au net de dessins et les fonctions que ce processus porte pour la conception. Notre objectif est évidemment de comprendre l'influence du dispositif informatique sur cette activité de mise au net. La construction de dessins nets sur base de dessins de brouillon est-elle différente sur calques numériques et sur papier-crayon ? L'explicitation graphique du bâtiment pour un logiciel d'interprétation, comme identifié dans l'étude précédente, est-elle équivalente à la mise au net de versions du bâtiment pour le concepteur ? En d'autres mots, l'approche logicielle change-t-elle radicalement la nature des dessins et de leur construction ou soutient-elle l'activité de mise au net telle que présente « naturellement » à l'étape du croquis ?

Hypothèses 1 et 2

2. Méthodologie

2.1. Dispositif expérimental

Afin de répondre à ces questions, nous avons observé l'activité de six étudiants ingénieurs-architectes en fin de formation dans un exercice de conception architecturale simplifié mais réaliste, calibré pour une durée de quatre heures maximum. Il s'agit du même énoncé que dans l'étude précédente : la réalisation d'une école de deux cent quarante élèves en milieu rural, avec un certain nombre de contraintes strictes, consignées dans un cahier des charges.

Afin de distinguer les impacts d'un environnement de croquis numérique de ceux induits par l'interprétation, les six participants ont été répartis dans trois conditions⁶⁰ (tableau 6).

- La première condition s'est effectuée à l'aide d'outils traditionnels : feuilles de papier, papiers-calques, crayons, surligneurs, stylos, etc. Aucune consigne particulière n'était donnée aux participants quant aux outils à utiliser, si ce n'est de circonscrire leur activité de dessin dans un espace déterminé par le champ de la caméra.
- La deuxième condition a pris place dans un environnement d'esquisses numériques de type « palette graphique » permettant l'utilisation d'un stylo électronique avec des fonctions de stylo et de surligneurs de différentes couleurs⁶¹. L'interface de ce logiciel est proche de celles d'EsQUIsE, mais il n'y a pas d'interprétation logicielle et pas de modèle 3D auto-généré ;
- La troisième condition (dessin numérique avec interprétation) a été effectuée sur le logiciel EsQUIsE. Ce prototype permet à l'utilisateur architecte de dessiner et de recevoir un *feedback* en temps réel sous la forme d'un modèle 3D basé sur l'interprétation sémantique de son croquis. Le logiciel EsQUIsE et son interface sont décrits plus en détail dans la section 1.2 du chapitre 3.

Les deux dernières conditions ont pris place dans un environnement d'interaction au stylo de grande taille (Bureau Virtuel de conception). En outre, tous les participants étaient autorisés à utiliser règles, équerres et calculatrices. Afin de permettre aux observateurs de contextualiser les actions du concepteur, une procédure classique de *think aloud* a été mise en place. Il était explicitement demandé au concepteur d'exprimer tout haut le fil de sa pensée, spontanément et sans tenter de la structurer. Une procédure d'une demi-heure d'entraînement au *think aloud* et, le cas échéant, à l'utilisation des logiciels, a précédé l'expérience. Cet entraînement avait aussi pour but d'harmoniser les connaissances des sujets quant aux environnements utilisés. Les trois situations diffèrent sur plusieurs dimensions, récapitulées dans le tableau 6.

	Situation 1	Situation 2	Situation 3
Participants	Participant 1 (P1) Participant 2 (P2)	Participant 3 (P3) Participant 4 (P4)	Participant 5 (P5) Participant 6 (P6)
Environnement	Table normale	Bureau Virtuel (table électronique)	Bureau Virtuel (table électronique)
Type de dessin	Réel	Numérique	Numérique
Logiciel	///	Palette graphique	EsQUIsE
Outils	Feutres, stylos, règles, équerres, etc.	Stylo électronique, règles.	Stylo électronique, règles.
Feuilles	Papiers, papiers-calques.	Calques virtuels.	Calques virtuels.
Interprétation du dessin	Non	Non	Oui
Dessin	Libre	Libre	Interprété (couleur noire), libre (autres couleurs).

Tableau 6
Comparaison des trois environnements.

⁶⁰ A noter que trois des six activités observées sont les mêmes que dans l'étude précédente. Ces données ont donc été complétées par d'autres et des grilles d'analyse spécifiques ont été mises en place.

⁶¹ Il s'agit en réalité du logiciel SketSha (voir section 1.2.3 du chapitre 3), utilisé de manière individuelle, sans connexion réseau et sans visio-conférence. Afin d'éviter les confusions, nous parlerons de « palette graphique »

Chacune des activités a été intégralement filmée en plusieurs vues, et analysée conjointement par un ergonome (pour les aspects cognitifs) et un architecte (pour les composantes métier).

Dans cette étude, nous cherchons principalement à croiser deux variables : le type de croquis (réel ou numérique) et la présence d'une interprétation logicielle. Ainsi, le plan expérimental est présenté au tableau 7.

		INTERPRETATION LOGICIELLE	
		Sans	Avec
TYPE DE CROQUIS	Réel	Situation 1 Papier-crayon	///
	Numérique	Situation 2 Palette Graphique	Situation 3 Logiciel EsQUIsE

Tableau 7
Plan expérimental.

2.2. Grilles d'analyses

Les analyses des 18 heures de vidéo des activités de conception ont porté sur trois volets.

D'une part, elle porte sur l'analyse des caractéristiques graphiques des dessins. Sur base des productions finales des participants (calques réels ou virtuels), nous avons analysé les propriétés des dessins : quantité, variété, épaisseur et précision des traits. Cette grille, basée sur les descriptions de Leclercq (2005) et Leclercq & Elsen (2007), identifie notamment des différences de propriétés graphiques des esquisses conceptuelles, des esquisses synthétiques et des plans CAO.

D'autre part, pour comprendre le processus dans sa dynamique temporelle, nous avons observé l'utilisation des supports de dessins (papiers, papiers-calques et calques virtuels). Nous pensons, à l'instar de Suwa *et al.* (2000), que les changements de page sont des moments où l'activité possède certaines particularités. Partant du principe que ces changements de support ne sont pas anodins en conception, puisqu'ils servent de base aux successions et transformations de dessins, nous avons décrit la temporalité de l'utilisation de ces supports de dessins. Pour ce faire, à chaque moment, nous identifions sur quel calque travaille le concepteur et le reportons dans des lignes du temps, du même type que celles réalisées dans l'étude précédente au sujet de la conception des étages. Sur ces lignes du temps, nous avons identifié des phases d'activités temporellement circonscrites, afin d'observer visuellement l'émergence d'une structure dans l'activité de dessin.

Enfin, sur base de cette description temporelle, nous avons sélectionné des moments particuliers de la conception qui sont caractéristiques de l'activité de mise au net, en l'occurrence les moments de création d'un nouveau calque pour le papier-crayon et la palette graphique, et les phases de travail multi-calques dans EsQUIsE (voir plus loin). Nous avons cherché à comprendre la dynamique du processus de transformation des dessins de brouillon en dessins nets. Pour ce faire, les extraits vidéo des moments concernés ont été analysés en détail par un ergonome et un architecte. L'objectif est de comprendre le déroulement de ces moments de transformation de l'esquisse du point de vue cognitif mais aussi sémantique et architectural. L'analyse, qui se veut qualitative, vise à identifier les fonctions et les modalités de cette activité de mise au net, afin d'aboutir à la définition des concepts d'interaction pour le développement d'interfaces-esquisses.

3. Caractéristiques des croquis

Les croquis observés dans les trois dispositifs expérimentaux présentent des caractéristiques graphiques sensiblement différentes. Nous synthétisons ci-dessous les principales propriétés des tracés en fonction de l'environnement de travail dans lequel ils ont été réalisés.

3.1. Croquis sur papier-crayon

L'activité de dessin à l'aide des outils traditionnels papier-crayon est caractérisée par la production d'une succession d'esquisses ambiguës et imprécises, dites de « brouillon » (figure 50). Ces croquis, dessinés exclusivement au crayon, possèdent toutes les caractéristiques des esquisses de conception décrites dans la littérature (« *thinking sketches* » de Ferguson, 1992 ou « croquis conceptuel » pour Leclercq & Elsen, 2007). Il y a peu de variabilité et peu de précision dans les traits, témoignant d'une rapidité dans l'exécution et rendant l'esquisse très ambiguë. Les traits sont accumulés les uns sur les autres, impliquant la coexistence de plusieurs solutions sur le même dessin. De nombreuses notes annexes (cotations, notes, calculs, etc.) et dessins seconds sont présents. Le dessin est souvent incomplet. Ainsi, ces esquisses ne représentent en effet pas une solution unique, mais plutôt un ensemble de solutions potentielles, souvent partielles.



Figure 50
Esquisse brouillon de P2.

Ces esquisses de brouillon sont régulièrement « mises au net » soit sur un autre calque, soit à même le dessin. Suite à cette action, le dessin prend des caractéristiques différentes (figure 51) : les traits sont toujours peu variés mais gagnent en précision. Ils ne sont plus accumulés (un trait représente une paroi) et il n'existe dès lors plus qu'une solution à cet instant. Les annotations textuelles sont rares et servent uniquement à nommer les espaces. Ces mises au net sont effectuées à l'aide de traits épais de crayons ou de surligneurs.

Ces dessins de nets et de brouillon, déjà identifiés dans l'étude précédente, sont imbriqués les uns dans les autres : les dessins de brouillon fournissent une base aux dessins nets, qui deviennent à

leur tour des dessins de brouillon au fur et à mesure des recherches formelles et conceptuelles. Sur les calques utilisés par les deux concepteurs observés, nous retrouvons plusieurs configurations hybrides entre ces deux types de dessins : la plupart des calques contiennent des structures mixtes de dessins, mais certains calques (principalement les premiers) contiennent exclusivement des dessins de brouillon et d'autres (les derniers) exclusivement des dessins nets.

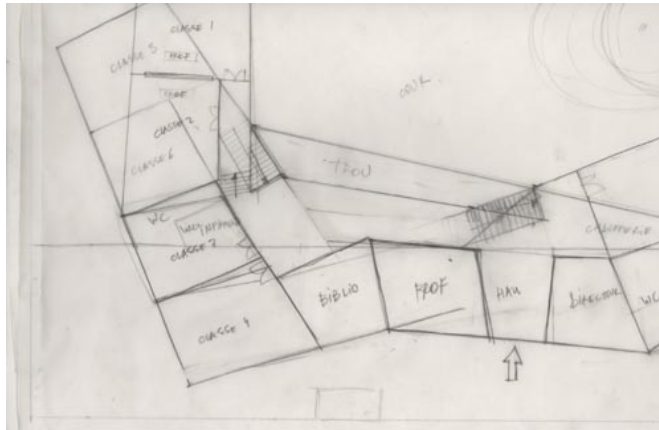


Figure 51
Esquisse nette de P2.

3.2. Croquis sur la palette graphique

Sur la palette graphique, on observe les mêmes caractéristiques de croquis que dans l'activité papier-crayon. Les deux activités débutent par la production de dessins ambigus et conceptuels, dans lesquels s'accumulent des traits imprécis de différentes couleurs (figure 52). On observe aussi sur ces esquisses la présence d'annotations. Plusieurs solutions coexistent sur ces dessins.

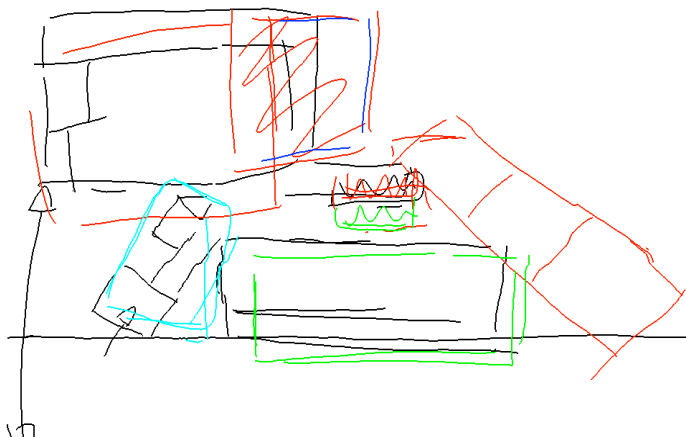


Figure 52
Esquisse brouillon de P3 (dans les premières étapes).

Au fur et à mesure du déroulement de l'activité, les dessins se font de plus en plus « propres ». Peu à peu, le rôle des traits se précise dans le plan et ceux-ci correspondent maintenant

clairement à la trace des murs. L'esquisse conceptuelle laisse progressivement place à des esquisses synthétiques et descriptives du bâtiment et de ses différents espaces (figure 53).

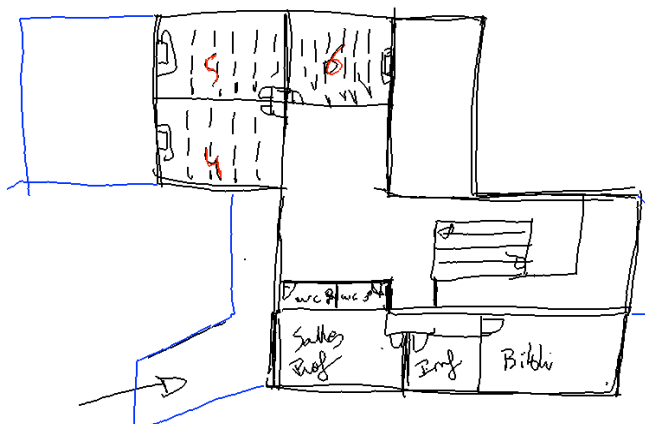


Figure 53
Esquisse nette de P3 (à la fin de l'activité).

Au niveau des caractéristiques graphiques des dessins, on remarque deux différences majeures avec le papier-crayon, induites par l'environnement de conception.

D'une part, les dessins sur la palette graphique, principalement les esquisses conceptuelles, contiennent moins de traits que leurs homologues sur papier-crayon. Ceci s'explique par les limites du dispositif technologique. Celui-ci ne permet que deux types de traits : surligneurs ou stylos virtuels. Ces traits ont des caractéristiques uniformes de largeur, de saturation des couleurs et d'opacité. Cette uniformité des outils engendre, par exemple, que la multiplication des traits à un même endroit ne modifie pas la saturation des couleurs ni le contraste du trait. Si un individu dessine avec un crayon sur une feuille de papier plusieurs fois exactement au même endroit, le trait original en est obligatoirement modifié : la couleur est plus profonde, le relief est plus marqué sur la feuille et le trait ressortira probablement du dessin. Ce n'est pas le cas sur le logiciel de palette graphique utilisé.

D'autre part, les dessins sont de taille plus importante sur l'environnement numérique que sur papier-crayon. Ici aussi les contraintes de la palette graphique jouent un rôle important : les traits sont plus épais dans l'environnement numérique et l'espace de travail est plus grand. L'échelle du dessin est par conséquent agrandie pour tirer profit de la taille de l'espace et compenser les contraintes des possibilités graphiques.

Néanmoins, le contenu et la densité sémantique des dessins sont comparables à ce que l'on retrouve sur le papier-crayon. D'un point de vue graphique, il semble donc que le concepteur pousse à son paroxysme le principe d'économie, propre à l'esquisse, et décrit par Leclercq (2005) : l'expression graphique est réduite au minimum nécessaire à la poursuite de l'objectif du concepteur. Pour la même information, il décrit son bâtiment avec moins de traits que sur papier-crayon. Ce constat est sans doute imputable à une plus grande difficulté à dessiner sur la palette graphique qu'avec des instruments « naturels ».

Les calques contiennent également des structures hybrides de dessins nets et de brouillon. La transparence paramétrable des calques est beaucoup utilisée par les concepteurs pour faire coexister leurs esquisses. Ainsi, ils peuvent par exemple mettre au net leurs dessins sur d'autres calques et ce, à même le dessin précédent en paramétrant le calque comme complètement transparent, puis opacifier leurs calques pour ne voir apparaître que les dessins mis au net.

3.3. Croquis sur EsQUISE

Comme dans la situation papier-crayon, et comme largement décrit dans l'étude précédente, deux types de dessins coexistent.

Les dessins de brouillon (figure 54) sont dessinés exclusivement en couleurs (c'est-à-dire non interprétés par le logiciel), et comprennent de nombreux traits, souvent imprécis, qui se superposent et sont rarement effacés. Plusieurs solutions et concepts coexistent. De nombreuses annotations et dessins de détails sont également présents sur ces dessins. La quantité de leurs traits se situe entre les croquis sur la palette graphique et ceux sur papier-crayon.

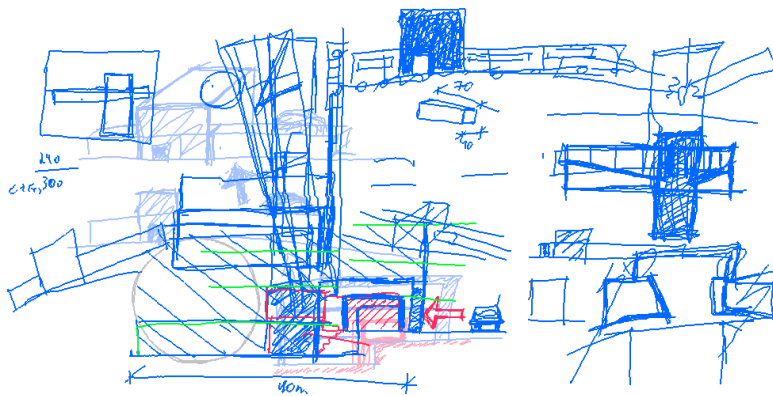


Figure 54
Esquisse numérique brouillon de P5.

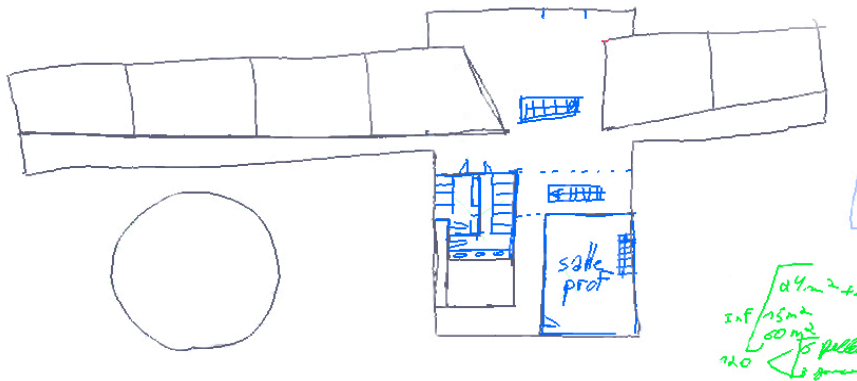


Figure 55
Esquisse numérique nette de P5.

Les esquisses « propres » et mises au net (figure 55), sont comparables aux dessins nets présents sur papier-crayon et sur la palette graphique : les traits sont plus droits et plus précis que sur les dessins de brouillon, chaque trait représente une paroi et chaque paroi est représentée uniquement par un trait. Néanmoins, ces dessins sont tracés exclusivement en noir (seule couleur interprétée par le logiciel) et le concepteur utilise fréquemment la gomme numérique. A noter qu'en fin de conception, certains de ces dessins nets sont annotés avec des éléments de couleur : aménagements intérieurs, légendes, etc.

Si les dessins sont comparables à ceux observés dans les autres activités, ils se différencient nettement des autres par leur localisation. En effet, on observe très clairement dans les deux activités sur EsQUISSE une spécialisation des calques : les dessins nets et de brouillon sont tracés sur des calques différents et ne coexistent jamais, comme c'était le cas dans les autres activités. Cette observation est très clairement liée aux propriétés du système : le logiciel, pour fournir au concepteur un modèle 3D cohérent, doit se baser sur des dessins moins ambigus que les esquisses de brouillon. C'est ainsi que tous les traits effectués en noir (seule couleur interprétée par le logiciel) doivent être nets. Or, pour faciliter cette différenciation, il semblerait que les deux concepteurs utilisant cet environnement mettent en place une stratégie de distinction spatiale : il est plus clair pour eux de séparer les esquisses interprétées de celles qui ne doivent pas l'être en les dessinant sur des supports (calques électroniques) bien distincts (voir étude précédente, chapitre 4, point 5).

3.4. Comparaisons

D'un point de vue strictement graphique, les dessins observés dans les trois environnements de travail possèdent plusieurs points communs et différences.

- **L'échelle** : les dessins réalisés sur un environnement numérique sont plus grands que ceux dessinés sur papier. Cela s'explique d'une part par la taille de l'espace de travail, le Bureau Virtuel proposant une surface proche du format A0 alors que les papiers-calques ne sont pas plus grands que le format A3. D'autre part, les caractéristiques des traits sur outil numérique diffèrent de ceux sur papier : leur épaisseur est fixée à 2 pixels sur la projection, taille beaucoup plus importante que la pointe d'un stylo-bille ou d'un crayon bien taillé. Il n'existe en outre que deux types de traits aux caractéristiques uniformes (surligneurs ou stylos), alors que le dessin sur papier permet un large éventail de possibilités de traits (en fonction de la pression, de l'inclinaison et du type de crayon). Ainsi, pour pouvoir avoir des dessins comparables, les participants sont dans la nécessité de compenser par une taille supérieure.
- **Le nombre de traits** : les dessins papier-crayon sont caractérisés par un nombre plus important de traits que les dessins numériques. Cela s'explique aisément par deux raisons : d'une part, comme pour le point précédent, le manque de variabilité des possibilités graphiques rend inutile la superposition de nombreux traits et, d'autre part, l'utilisation d'un système de grande taille (Bureau Virtuel) rend sans doute le geste de dessin un peu plus compliqué, incitant l'utilisateur à « économiser » les traits superflus.
- **La quantité d'informations** : malgré ces différences importantes entre les dessins, il s'avère que la quantité d'informations présentes sur les esquisses est relativement similaire dans les différents dispositifs. Ainsi, les esquisses numériques, qui sont manifestement moins « chargées » puisqu'elles sont plus grandes, contiennent les mêmes informations (identification des espaces, taille des murs, annotations, aménagements, etc.) que les croquis papier.

- **Les deux types de dessins** : nos observations tendent à confirmer la présence de deux formes d'esquisses utilisées dans la phase conceptuelle de la conception. La première, l'esquisse conceptuelle, est caractérisée par un haut degré d'ambiguïté et de personnalisation qui rendent ardue voire impossible sa communication à autrui. Elle contient de multiples solutions graphiques au problème architectural. Dans EsQUIsE, nous avons constaté que les architectes réalisent ces esquisses conceptuelles exclusivement en couleur afin d'éviter leur reconnaissance par le logiciel qui se traduirait par des incohérences dans l'interprétation. La deuxième forme, l'esquisse synthétique, est issue d'activités régulières de mises au net. Le dessin est moins ambigu et plus conventionnel que dans la précédente. Chaque frontière (mur, paroi vitrée, etc.) est représentée par un trait unique et ces frontières servent à circonscrire des espaces différenciés et donc à arrêter un agencement spatial particulier. L'esquisse synthétique est en grande partie interprétable par un autre architecte. Dans EsQUIsE, ces esquisses sont dessinées en noir, en vue d'être interprétées par le logiciel.
- **La localisation** : dans les activités sur papier virtuel avec interprétation (EsQUIsE), on constate une spécialisation des calques en deux types : des calques ne contenant que des esquisses synthétiques et d'autres contenant uniquement des esquisses conceptuelles. Dans les activités papier-crayon ainsi que sur le logiciel de palette graphique, chacun des calques contient conjointement à la fois des dessins de brouillon et des dessins au net.

En outre, tous les participants arrivent au même stade de définition du bâtiment à l'issue de l'activité et tous les résultats sont jugés équivalents en termes de qualité et de quantité d'information. Il n'est dès lors pas possible d'identifier un réel effet de l'environnement numérique sur la qualité du travail.

4. Utilisation temporelle des calques et supports

Les activités observées ont donné lieu à la définition de lignes du temps de l'utilisation des différents supports (calques, papiers, etc.). Ces lignes du temps indiquent, à chaque moment, sur quel calque porte l'activité graphique⁶². Dans cette section, nous montrons et expliquons les six lignes du temps correspondant à l'activité de conception des six participants. Ces lignes du temps nous permettent d'appréhender le processus de conception dans son ensemble, et d'en identifier des phases et des structures récurrentes. En ordonnée sont listés les différents supports (feuilles, calques et calques virtuels) et en abscisse le temps, arrondi à la minute. Les phases identifiées sont circonscrites dans le temps par des lignes verticales et sont nommées par une lettre.

4.1. Utilisation des calques sur papier-crayon

L'utilisation des calques lors des deux activités ayant pris place dans l'environnement traditionnel papier-crayon peut être représentée comme suit (figure 56).

⁶² Les lignes du temps ne présentent que les actions de dessin. Elles ne reprennent pas les éventuelles prises d'informations visuelles sur d'autres calques.

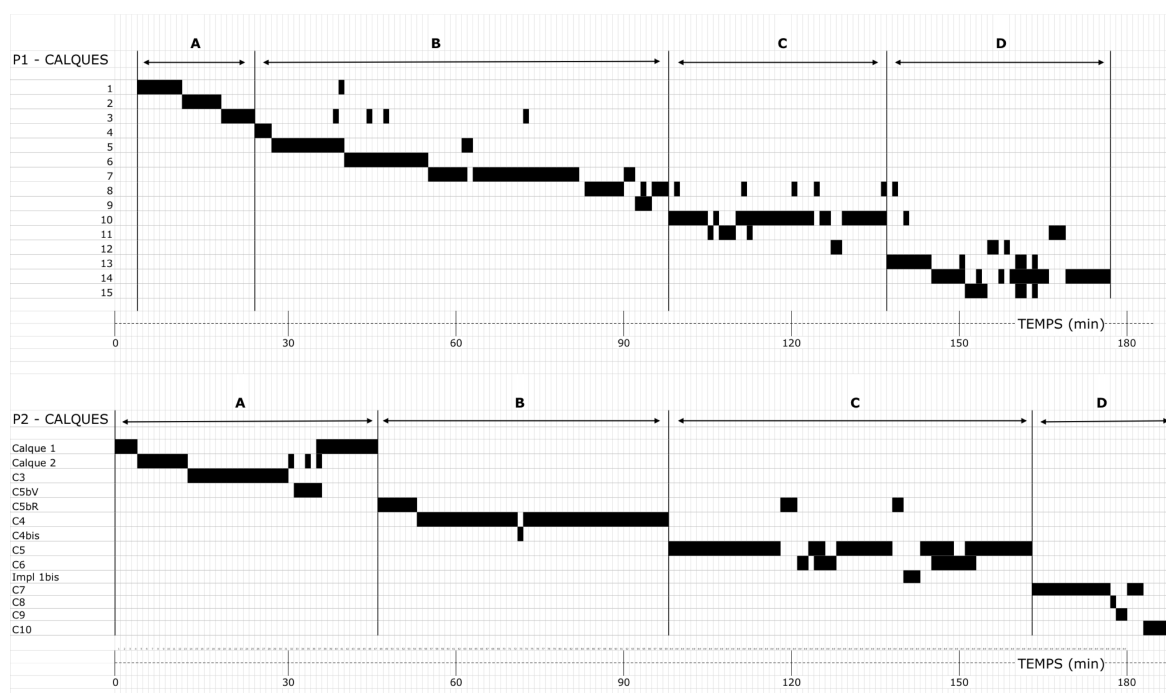


Figure 56

Lignes du temps de l'emploi des calques lors des activités des participants sur papier-crayon (P1 et P2).

Ces deux activités sont relativement semblables. De nombreux calques sont utilisés et l'approche est « en escalier » : les calques se succèdent dans le temps et sont rarement réutilisés. On peut identifier plusieurs phases, comparables chez chacun des participants.

- Une phase d'exploration conceptuelle (phase A pour P1 et P2) consistant à poser les premières bases, à restructurer les données de l'énoncé, à imaginer une première forme du bâtiment dans son ensemble et à définir l'emprise au sol du bâtiment.
- Une phase de travail sur le rez-de-chaussée (phase B), consistant à résoudre l'essentiel des problèmes relatifs au rez-de-chaussée et d'en aménager précisément l'intérieur.
- Une phase de travail sur les étages (phase C), consistant à définir, en fonction des contraintes liées au rez-de-chaussée, les éléments architecturaux des étages. Cette phase comprend quelques retours en arrière sur le rez-de-chaussée afin de coordonner les différentes contraintes.
- Une résolution des problèmes finaux. Il s'agit, sur base des éléments précédents, de finaliser le bâtiment : aménagement intérieur et extérieur, éventuellement dessin de coupes ou perspectives.

Chacune de ces phases est caractérisée par l'utilisation de calques strictement différents⁶³. Dans les premières phases, les concepteurs se concentrent sur un seul calque et un seul dessin à la fois, tandis que dans les deux dernières phases, ils travaillent sur plusieurs calques en parallèle. En effet, en fin de processus, il leur est nécessaire de propager les contraintes et d'évaluer correctement les conséquences des décisions relatives à une partie du bâtiment sur les autres parties de ce même bâtiment.

Les changements de calques correspondent au démarrage d'un nouveau dessin. Nous pouvons identifier plusieurs types d'activités lors de ce changement :

- un nouveau dessin est créé à partir de rien ;

⁶³ A deux exceptions près : la calque 8 pour P1, utilisé en phase B et C, et le calque C5bR pour P2, utilisé aussi en phase B et C.

- un dessin précédent est recopié dans son intégralité avant de servir de base à un autre ;
- un dessin est partiellement recopié pour servir de base à un autre.

Les deux derniers types peuvent être qualifiés de mise au net de dessin : le concepteur transforme ses dessins de brouillon en dessins au net. Une fois un dessin mis au net, il n'est plus modifié, même s'il est parfois consulté. Cette mise au net peut s'effectuer en se basant sur la transparence des calques ou en repartant d'une feuille blanche.

4.2. Utilisation des calques sur la palette graphique

L'utilisation des calques lors des deux activités ayant pris place dans l'environnement numérique sans interprétation (palette graphique) peut être représentée comme suit (figure 57).

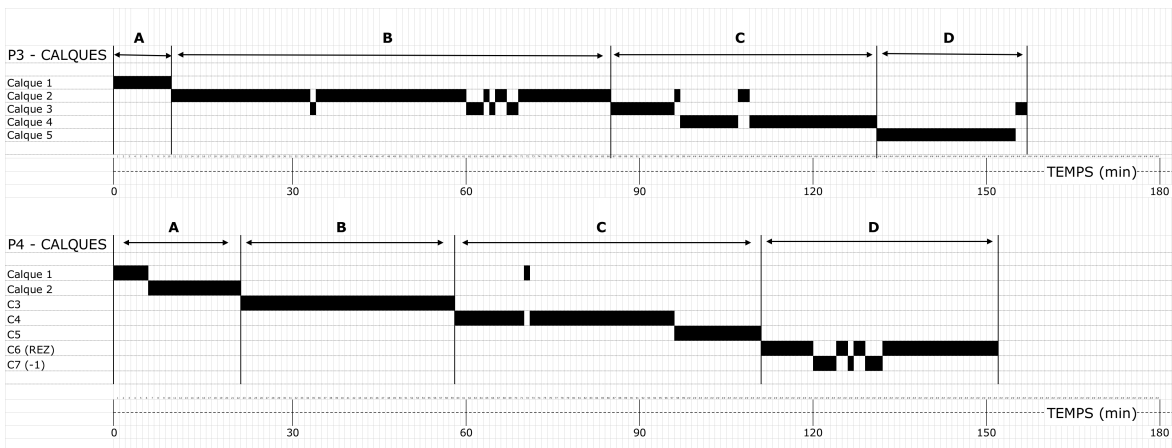


Figure 57

Lignes du temps de l'emploi des calques lors des activités des participants sur SketSha (P3 et P4).

Comme dans la situation papier-crayon, les deux activités sont tout à fait comparables entre elles et nous y retrouvons les mêmes phases : exploration (phase A), conception du rez-de-chaussée (phase B), conception des étages (phase C) et finitions (phase D). Ici aussi les calques sont peu réutilisés entre les phases. Par contre, il y a beaucoup moins de calques : 5 et 7 sur palette graphique contre 14 et 15 sur papier-crayon. La transparence des calques virtuels est régulièrement adaptée pour afficher plusieurs dessins simultanément. Les changements de calques sont également accompagnés de moments de mise au net, comparables à ceux existant sur papier-crayon. Les calques, une fois mis de côté, sont très peu réutilisés. Ils sont néanmoins consultés régulièrement, notamment par le biais de la transparence, et sont même parfois utilisés comme complément au dessin en cours, en réglant leur transparence au maximum. Enfin, à quelques rares exceptions près, les calques sont modifiés individuellement, les concepteurs travaillant rarement en parallèle sur plusieurs calques.

Comme évoqué précédemment, les dessins évoluent de représentations conceptuelles vers des représentations synthétiques dans un mouvement global. Chaque esquisse précise le concept et est de plus en plus « propre », jusqu'à ce que les concepteurs, à partir de la moitié de leur activité environ, n'utilisent plus que des esquisses synthétiques. En outre, les activités sur palette graphique sont globalement moins longues que sur les deux autres environnements (environ 150 minutes, contre respectivement 180 et 190 pour le papier-crayon et EsQUIsE).

4.3. Utilisation des calques sur EsQIIsE

L'utilisation des calques lors des deux activités ayant pris place dans l'environnement numérique avec interprétation (logiciel EsQIIsE) peut être représentée comme suit (figure 58).

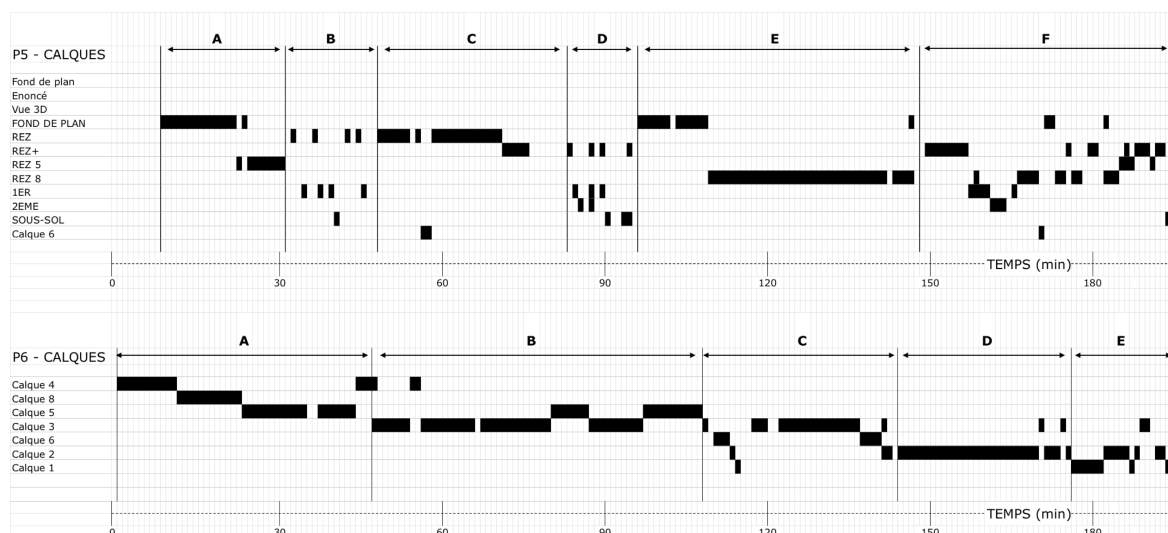


Figure 58

Lignes du temps de l'emploi des calques lors des activités des participants sur EsQIIsE (P5 et P6).

Sur EsQIIsE, la structure est manifestement différente de celle observée dans les deux autres environnements. Ici, outre la phase d'analyse aussi présente dans les deux activités (phases A), on voit apparaître deux types de phases très différenciées :

- des phases de travail mono-calque durant lesquelles le concepteur travaille principalement sur un calque (ou alterne de longues séances de travail sur deux calques) : phases C et E pour P5 et phases B et D pour P6 ;
- des phases de travail multi-calques durant lesquelles le concepteur travaille sur plusieurs calques en même temps, en passant de l'un à l'autre très rapidement : phases B, D et F pour P5 et phases C et E pour P6.

Lors des phases mono-calque, les concepteurs travaillent exclusivement sur des calques de brouillon, tandis que dans les phases multi-calques, ils modifient l'ensemble de leurs calques « nets ». Ils dessinent donc tous les croquis conceptuels en utilisant un seul calque, et remettent au net leurs dessins en esquisses synthétiques sur plusieurs calques différents. La mise au net n'intervient d'ailleurs que dans les phases de travail multi-calques.

Ainsi, l'activité de mise au net de dessins ne s'inscrit pas dans la continuité du dessin conceptuel, comme dans les autres activités, mais consiste bien en une phase à part entière. La mise au net de tous les dessins est effectuée à des étapes-clés. C'est lors de ces étapes de mise au net, et uniquement lors de celles-ci, que le modèle 3D auto-généré est appelé, consulté et manipulé. Cette organisation émergente de l'activité s'explique par les modalités du dialogue homme-machine, comme déjà identifié dans notre première étude. Afin de bénéficier d'un modèle 3D propre et cohérent, le concepteur doit en effet disposer de l'ensemble de son bâtiment interprété, c'est-à-dire que tous les étages doivent être dessinés au trait noir et de manière peu ambiguë. Ainsi, il met au net tous ses calques au moment où il souhaite visualiser l'interprétation de son bâtiment par le logiciel.

Enfin, le nombre de calques utilisés est proche de celui observé dans l'environnement numérique sans interprétation : 9 pour P5 et 7 pour P6. En outre, alors que les calques de brouillon sont peu réutilisés, les calques nets, par contre, sont modifiés régulièrement : le modèle numérique est donc effacé et recomposé plusieurs fois.

4.4. Comparatifs

Les différentes lignes du temps et les descriptions du processus montrent clairement des différences entre les trois environnements. On peut synthétiser les processus de la façon suivante (figure 59).

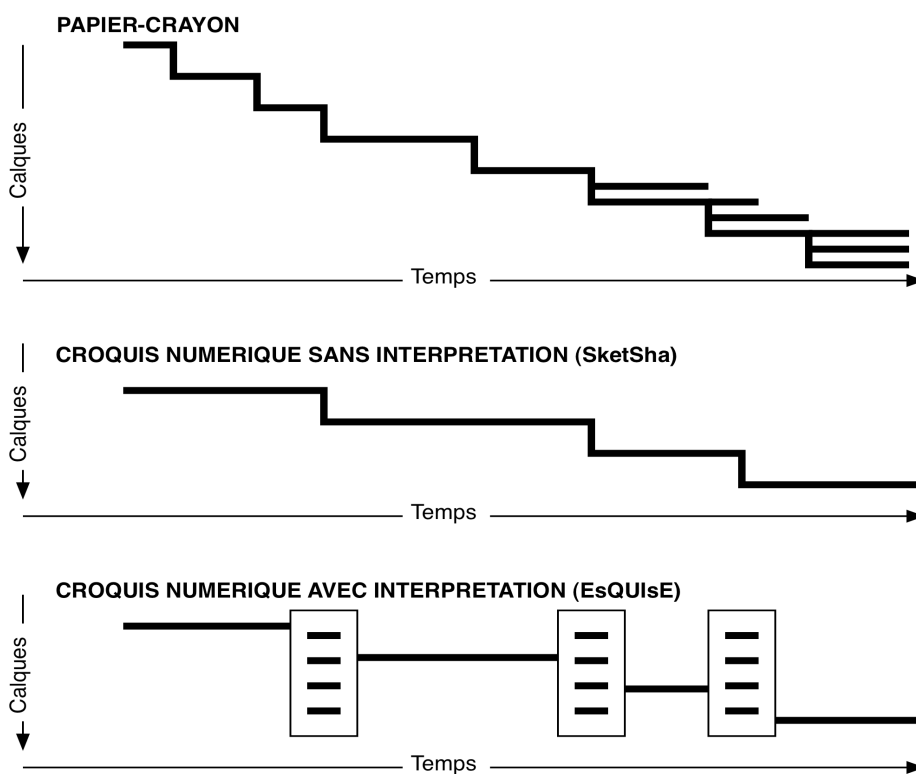


Figure 59
Comparaison schématique des processus dans les trois environnements.

Plusieurs éléments permettent de distinguer les trois activités.

- **Le nombre de calques.** On observe l'utilisation de moins de calques dans les environnements numériques. Par contre, cette réduction du nombre de calques s'accompagne de la coexistence de plusieurs dessins sur un même support. Plusieurs facteurs participent à cette différence de comportement. D'une part, la dimension des calques n'est pas limitée et le concepteur n'est donc jamais obligé de changer de support par manque de place. D'autre part, la transparence des calques est à tout moment modulable, ce qui permet au concepteur de voir dynamiquement même les traits les plus fins des supports inférieurs ou, au contraire, de travailler sur un support opaque. Les augmentations du papier numérique procurent donc un avantage de souplesse au concepteur, ce qui lui permet de rassembler les informations sur les mêmes supports. Mais nous constatons aussi que l'agencement des calques et la gestion de leur superposition ne sont pas

nécessairement aisés pour les concepteurs. La limitation du nombre de calques proviendrait donc peut-être aussi d'une volonté de limiter ces manipulations.

- **La réutilisation des calques.** Sur papier et avec la palette graphique, nous observons un graphe « en escalier » qui témoigne du fait que le concepteur ne revient pas sur les calques précédents. Sur EsQUIsE, si nous observons le même phénomène pour les calques de brouillon, les calques nets, destinés à l'interprétation 3D, sont quant à eux réutilisés régulièrement. Il existe de nombreuses représentations plus ou moins abstraites ou abouties du bâtiment mais le concepteur ne manipule qu'un seul modèle de son projet. Ceci aboutit à une forme de processus destructif : le concepteur modifie un unique modèle du bâtiment plutôt que de conserver un historique du processus. Ce caractère destructif est propre aux modèles de CAO/DAO (McCall *et al.*, 2001).
- **La différenciation des calques.** Lors du travail sur papier, un croquis réalisé au net sert de base à la poursuite de la simulation et devient donc de ce fait un croquis de brouillon. Ce brouillon est à son tour remis au net sur le même support ou lors d'un changement de calque et le processus recommence. On observe donc une coexistence de croquis de brouillon et de croquis nets sur les mêmes calques. On observe la même structure sur l'environnement sans interprétation. EsQUIsE, au contraire, favorise la différenciation de ces deux types de représentations : d'une part des calques brouillons et d'autre part des calques nets.
- **Utilisation simultanée des calques.** Malgré une réflexion approfondie sur la notion de calques virtuels et sur l'ergonomie de leur manipulation, l'environnement numérique n'offre pas la même souplesse que les feuilles de papier. Par exemple, il n'est pas possible actuellement de disposer côte à côte deux documents. Ainsi, plutôt que de manipuler régulièrement les onglets des calques pour en changer, le concepteur ne travaille que sur un seul calque à la fois pour concevoir et utilise intensément la transparence.
- **Phasage des activités de mise au net.** Lors du dessin avec le logiciel EsQUIsE, on observe des phases très caractéristiques de travail sur plusieurs calques en même temps. Elles correspondent à la transcription des idées issues des esquisses conceptuelles et leur mise au net sur des croquis synthétiques, pour l'interprétation par le système et la génération du modèle 3D. Au contraire, dans les deux autres environnements, la mise au net est récurrente et porte sur les derniers croquis conceptuels.

5. Activité de mise au net

Dans cette section, nous nous intéressons aux activités cognitives sous-tendant le processus de mise au net, considéré ici comme l'activité visant à transformer une esquisse conceptuelle en croquis synthétique. La dynamique de cette activité diffère suivant les trois environnements.

5.1. Mise au net sur papier-crayon

Dans les activités sur papier-crayon, nous observons différents mécanismes et fonctions de la remise au net.

- **Choisir un tracé.** Sur le dessin de brouillon (figure 50), les éléments architecturaux sont fréquemment délimités par plusieurs traits, plus ou moins superposés, plutôt que par des contours simples. Lors de la mise au net, ces traits sont remplacés par un tracé unique, généralement plus épais (voir figure 51). De cette opération découle donc une simplification du dessin et une réduction du flou graphique. Cela consiste à remplacer un groupe de traits par un seul. Mais nous observons qu'il ne s'agit pas uniquement de retracer la solution la plus saillante. Il s'agit surtout de poser un choix conscient : sélectionner une seule position pour un objet quand le dessin de brouillon en présentait plusieurs. Ce choix n'engage cependant pas le concepteur pour l'entièreté du processus : le dessin remis au net pourra de nouveau devenir brouillon et ces choix pourront être remis en cause. Cependant la mise au net aura permis de figer certains éléments et de donner un contexte provisoire à l'activité de conception.
- **Dessiner à la règle.** Le dessinateur abandonne le dessin à main levée préférant utiliser une règle pour tracer des segments de droite. Il s'agit donc ici aussi d'un mécanisme de réduction du flou et de l'imprécision du tracé. Le trait se rapproche de la projection de l'objet architectural qu'il figure (par exemple le mur).
- **Préciser les mesures.** Le concepteur affecte une mesure précise aux traits lors de la remise au net. Il ne s'agit pourtant pas d'une action de génération mais plutôt d'une mesure d'évaluation, de vérification. Le dessin de brouillon découle en effet déjà d'une réflexion sur les dimensions mais le flou et l'imprécision de cette représentation ne permettent pas de contrôler les contraintes géométriques liées au programme architectural. La réduction du flou graphique s'accompagne d'une réduction de l'imprécision et souvent d'une vérification fonctionnelle des dimensions.
- **Expliciter le fonctionnement.** La mise au net s'accompagne aussi d'ajouts de légendes au dessin, permettant notamment de situer les locaux. De plus, le concepteur rajoute certaines informations : représentation du mobilier, position des portes, annotations, etc.. La vitesse d'exécution de cette tâche, quasi automatique, nous laisse croire qu'il s'agit d'une opération d'explicitation (réduction de l'ambiguïté) plutôt que d'une opération de génération de solutions : l'aménagement intérieur n'est pas conçu à ce stade, le dessin du mobilier permet simplement de donner des indications sur le fonctionnement du bâtiment.
- **Utiliser la gomme.** Les concepteurs utilisent parfois la gomme sur le dessin au net, ce qui n'est pas le cas pour les dessins de brouillon. Pour ces derniers, ils laissent coexister des traits de toutes sortes et des solutions multiples. La correction se fait par incrémentation du croquis.
- **Surligner.** Un des deux participants surligne à plusieurs reprises à l'aide d'un marqueur épais les traits de certains locaux. Un local dont le contour est surligné est temporairement « gelé » : le concepteur n'y travaillera plus avant un certain temps. Ce surlignage n'est pas précis (traits épais et tracés à main levée) mais concerne toujours des éléments issus d'une mise au net précédente.

Ces six éléments montrent que la remise au net fait évoluer le dessin d'une représentation floue et imprécise, que nous pouvons qualifier de conceptuelle, vers une représentation précisée géométriquement. Cette réduction de l'incertitude du dessin est une des caractéristiques fondamentales du processus de conception en architecture (Lebahar, 1983).

On observe en outre deux types de mise au net. Le premier, évoqué ci-dessus, consiste à opérer un choix parmi plusieurs solutions. Ce choix, éventuellement validé par une vérification dimensionnelle, est retranscrit dans une plus grande précision géométrique. Le second type de mise au net consiste uniquement à retranscrire le dessin « au propre ». Ici les traits sont repassés

finement, sans augmentation de la précision et sans vérification dimensionnelle. Il s'agit simplement de reporter des éléments non aboutis d'une représentation à une autre. Les éléments sont simplement retranscrits, ils feront l'objet de réflexions de conception plus tard dans le processus. Lorsque le concepteur utilise un nouveau calque pour redessiner le projet, ce calque peut être à la fois composé d'éléments mis au net (sélection consciente parmi les possibles) et d'éléments simplement retranscrits (dupliqués). Cette méthode lui permet de valider certaines parties du projet sans attendre la cohérence complète de la représentation.

Enfin, nous observons chez les deux participants que l'activité de mise au net n'est pas clairement dissociée de l'activité de génération : les moments de mise au net sont entrecoupés de moments de génération de solutions.

5.2. Mise au net sur palette graphique

Dans l'environnement numérique sans interprétation, les activités impliquées dans la mise au net sont globalement du même ordre que celles sur papier-crayon.

Des **choix** sont opérés parmi les différents traits.

Les traits sont affinés et **précisés**. Ici les concepteurs n'utilisent pas de règle, mais se servent de la grille affichée sur le dessin pour dessiner les murs droits. Le dessin est plus lent lors de ces mises au net, pour garantir une précision.

Des **mesures** sont prises, toujours à l'aide de cette grille.

Certaines annotations viennent compléter le dessin pour **l'expliquer**.

Les **surligneurs** sont aussi des outils privilégiés pour cette mise au net.

La **gomme** est parfois utilisée.

Néanmoins, une différence majeure tient à la fréquence de cette activité. La mise au net à proprement parler ne prend part que dans la première moitié de l'activité, où des dessins conceptuels sont transformés en croquis synthétiques, servant de base aux dessins conceptuels (comme dans l'environnement papier-crayon). Dans la seconde moitié de l'activité, chez les deux participants, les dessins sont en revanche uniquement tracés au net et l'esquisse conceptuelle disparaît de l'activité du concepteur. La recherche conceptuelle et la génération de solutions ne sont donc plus directement supportées par le dessin de brouillon. Ces activités semblent plus mentalisées : il y a moins d'expression graphique directe et les décisions sont prises par le concepteur avant de les externaliser avec le stylo. La production de dessins dans cette seconde moitié de l'activité peut être considérée comme une mise au net directe du modèle mental, et non plus de l'esquisse conceptuelle : ces dessins sont directement plus précis, moins ambigus que ceux observés dans la première partie de l'activité.

5.3. Mise au net sur EsQUIsE

Comme évoqué précédemment, nous observons une méthode de travail très particulière liée aux activités de conception dans l'environnement numérique avec interprétation. Alors que l'essentiel de l'activité se déroule sur un seul calque, nous identifions des séquences ponctuelles durant lesquelles l'ensemble des informations d'un calque « brouillon » est mis au net sur plusieurs calques « nets ». Autrement dit, de longues séquences de simulation sur un calque unique sont ponctuées par des moments de remise au net lors desquelles tous les étages du bâtiment sont redessinés en même temps, en vue d'une interprétation par le logiciel. L'activité de mise au net est bien circonscrite dans le temps et peut donc être comprise comme une « phase » du travail de

conception. Lors de ces phases, le concepteur remet toujours au net l'entièreté des plans. En effet, contrairement à la mise au net sur papier, qui peut ne concerner qu'une partie du plan ou être interrompue par des actions de conception, l'activité des concepteurs sur EsQUIsE consiste à produire, en une fois, une représentation complète et cohérente du bâtiment. Nous décrivons ci-dessous plus en détail les opérations menées lors de ces « phases de mise au net ». Un exemple de calque numérique brouillon et de calque numérique net sont donnés aux figures 54 et 55.

Vérification et précision. Comme s'il travaillait sur papier, le concepteur effectue la remise au net de certains traits à la règle et vérifie précisément ses mesures. Par contre, entre les éléments remis au net et les brouillons, on constate une moins bonne correspondance que sur papier. Certains éléments retranscrits ne sont pas directement issus du brouillon. Cela s'explique notamment par le fait que le dessin de tous les étages nécessite, en vue de faciliter l'interprétation logicielle, des opérations de coordination entre les niveaux qui sont reportées à plus tard dans l'activité sur papier.

Mise au net exhaustive. Contrairement aux autres environnements, la mise au net porte toujours ici sur l'ensemble du bâtiment. Le concepteur organise son temps de manière différente en réalisant la mise au net de tous les étages en une seule étape.

Modification des versions précédentes. Après une phase de simulation, les concepteurs ne recréent pas de nouveaux dessins nets. Ils utilisent la possibilité offerte par le système d'effacer des traits et corrigent les plans déjà tracés au net, conformément au nouvel état d'avancement du projet.

Explicitation minimale. Les concepteurs, en remettant leurs esquisses conceptuelles au net, établissent un lien direct entre les représentations nettes et l'interprétation qu'en opère le logiciel (ici un modèle 3D auto-généré). Ceci est particulièrement frappant pour le participant P5, qui ne remet au net que les contours des locaux. Il ne redessine pas le mobilier et n'ajoute pas de légendes. Il s'agit donc bien de reproduire uniquement ce qui est interprété par le système. P6 ajoute quelques légendes en couleurs, non interprétées par le logiciel.

Dans le cas des participants travaillant sur EsQUIsE, il apparaît clairement que l'activité d'interprétation du logiciel (la génération du modèle 3D) influence fortement la méthode de travail : la remise au net dans EsQUIsE n'a pas uniquement un rôle « interne » pour le concepteur, mais est un élément central du dialogue homme-machine. Elle est utilisée pour fournir à la machine la description du bâtiment en vue de son interprétation, notamment pour la génération du modèle 3D. C'est sans doute pour cette raison que les concepteurs sont attentifs à retracer dans la même étape les plans complets et de tous les niveaux, plutôt qu'uniquement la partie qui les intéresse. Cela permet de vérifier l'interprétation du logiciel et la cohérence du modèle de bâtiment généré.

5.4. Comparaison des activités dans les trois environnements

On retrouve des différences et des similitudes dans l'ensemble de ces activités. Pour synthétiser, nous pouvons affirmer que les opérations de transformations du dessin de brouillon en dessin net sont les mêmes dans les six activités.

- **Une simplification graphique.** Elle s'opère par réduction du nombre de traits, soit en choisissant un trait parmi plusieurs possibles, soit en ne recopiant pas dans la mise au net certains éléments graphiques (hachures, annotations, etc.) Cette opération permet de réduire le flou de l'esquisse.
- **Une réduction de l'imprécision.** Elle s'observe de manière très claire lors des mises au net à la règle qui s'accompagnent très souvent de vérifications dimensionnelles (largeur d'un couloir, surface d'un local, recul du bâtiment, etc.).

- **Une réduction de l'ambiguïté.** Elle s'opère par une évolution du dessin vers des conventions graphiques partagées ou par l'explicitation du contenu par ajout de légendes ou de symboles.
- **La sélection d'une unique solution.** Sur les esquisses de brouillon, il n'est pas rare de voir coexister plusieurs solutions architecturales. La mise au net opère un choix parmi différents possibles présents dans l'esquisse conceptuelle.

Par contre, les objectifs de ces transformations ne sont pas les mêmes dans les différents environnements. Dans tous les cas, il s'agit d'arrêter temporairement une version du bâtiment. Lors du travail sur papier et sur palette graphique, la mise au net vise avant tout à réduire la complexité du problème architectural, en passant de dessins aux solutions multiples et imprécises à un dessin présentant une solution unique. Sur EsQUIsE, cette mise au net vise à dialoguer avec la machine, à décrire le plan en vue de l'interprétation et, en retour, en recevoir des évaluations (le modèle 3D). C'est donc principalement à cette étape que le concepteur, en plus de sélectionner la solution, procède à sa vérification.

Par ailleurs, comme évoqué à plusieurs reprises, la gestion de l'espace virtuel de dessins composé de l'ensemble des calques est différente dans l'activité sur papier et sur ordinateur. Sur papier, les calques se succèdent et reçoivent des représentations nettes qui deviennent ensuite une base pour l'activité de simulation. On assiste donc à la coexistence des deux types de représentations sur la même feuille. Au contraire, les calques numériques sont spontanément dédiés à l'une ou l'autre de ces activités. Pour SketSha, les calques brouillons sont progressivement remplacés par des calques nets et pour EsQUIsE, les calques nets existent indépendamment des calques brouillons, en vue de disposer en permanence d'un modèle cohérent.

Une autre différence majeure entre les activités sur les trois environnements est relative à la gestion de la succession des dessins synthétiques et conceptuels, ainsi qu'à la temporalité de la mise au net. La succession des dessins s'organise de manière différente dans les trois activités, schématisées dans la figure 60.

Dans les activités sur outils traditionnels, on observe des itérations entre esquisses conceptuelles et esquisses synthétiques : les concepteurs dessinent des croquis de brouillon, qu'ils mettent au net, avant de les réutiliser eux-mêmes comme brouillons, qui seront à leur tour mis au net, etc. Les périodes de simulation et de remise au net alternent sur papier. Le concepteur passe aisément de l'une à l'autre, changeant ou non de calque.

Dans les activités de croquis numériques sans interprétation, on voit évoluer globalement les représentations d'esquisses conceptuelles vers des esquisses synthétiques. Si les premiers calques comprennent les deux types de dessins, à l'instar des activités sur papier-crayon, les calques utilisés dans la seconde partie de l'activité ne comprennent plus que des dessins synthétiques. Les dessins de brouillon sont, au fur et à mesure du déroulement de l'activité, remplacés par des dessins nets. L'absence de dessins conceptuels en deuxième partie d'activité est rendue possible par le degré d'avancement du travail. L'objet est suffisamment concret pour ne pas nécessiter de simulation. Dès lors, sans doute pour économiser le « coût » du tracé, plus grand et moins expressif que sur papier-crayon, le concepteur ne dessine plus que des croquis essentiels pour la conception : les esquisses synthétiques qui permettent d'arrêter les décisions.

Dans les activités de croquis numériques avec interprétation, les deux types de dessins coexistent : les esquisses conceptuelles sont présentes sur certains calques et les esquisses synthétiques sur d'autres. Les concepteurs travaillent tour à tour sur une seule de ces catégories d'esquisses et la mise au net consiste à modifier les versions précédentes des esquisses synthétiques, sur base des simulations. Contrairement aux autres environnements, sur EsQUIsE, le concepteur engagé dans une phase de remise au net poursuit cette activité jusqu'à l'obtention

de tous les plans du bâtiment. La mise au net est donc complète et constitue une phase en soi de l'activité.

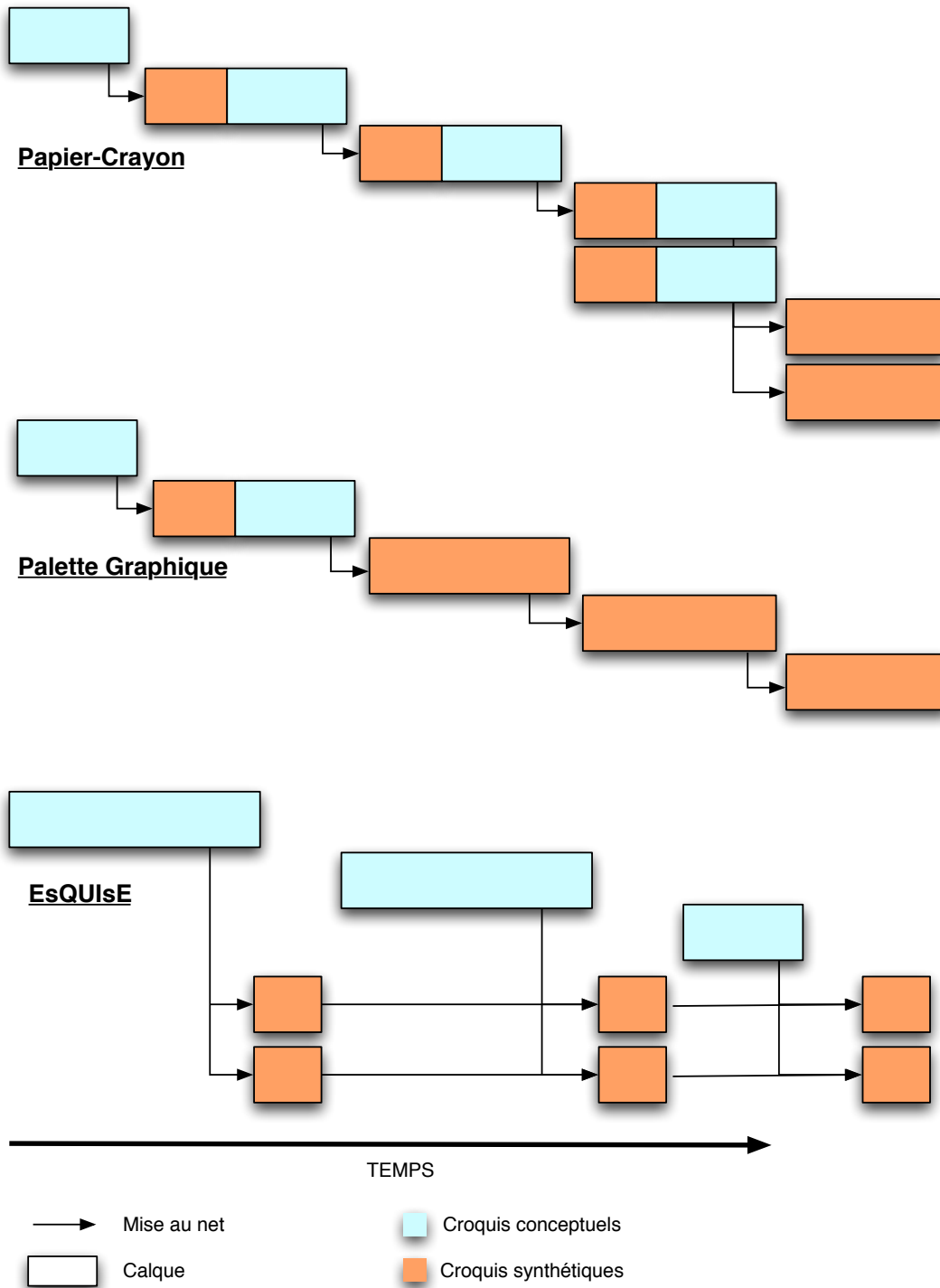


Figure 60
Succession temporelle des esquisses conceptuelles et synthétiques.

Les différences relatives à l'activité de mise au net entre les trois environnements sont synthétisées dans le tableau 8

	Papier-crayon	Palette graphique	EsQUIsE
Objectif	Réduire la complexité du croquis.	Réduire la complexité du croquis.	Décrire le projet en vue de la génération du modèle 3D.
Gestion de l'espace	Coexistence sur un même calque de dessins nets et de brouillons.	Spécialisation des calques (nets ou de brouillons) dans la seconde moitié de l'activité.	Spécialisation des calques (nets ou de brouillons).
Temporalité	Alternance de simulations et remises au net sur un même calque.	Uniquement des dessins nets dans la seconde partie de l'activité.	Remise au net de tout le bâtiment en une seule fois.

Tableau 8
Récapitulatif des différences dans la mise au net de dessins.

6. Discussion

De nombreux auteurs ont mis en avant l'intérêt de l'esquisse en conception préliminaire, par opposition aux outils de CAO. La souplesse de l'interaction (Bilda & Demirkan, 2003) et l'expressivité du croquis (Rodgers *et al.*, 2000 ; McCall *et al.*, 2001) sont des atouts indéniables de ce mode d'expression. D'autres auteurs ont montré l'intérêt des interfaces tangibles, dont le stylo est une forme rudimentaire, comme vecteur d'un plus grand investissement corporel dans la recherche de solutions, ce qui est reconnu comme facilitant la cognition spatiale (Kim & Maher, 2008). Néanmoins, peu d'études se sont penchées sur l'influence du caractère numérique du croquis, c'est-à-dire la comparaison entre le croquis papier et le croquis numérique.

Il convient tout d'abord de souligner les limitations de l'étude. Le nombre réduit d'observations ne peut nous permettre de généraliser nos résultats. Le public observé, composé d'étudiants, rend hasardeuses les conclusions relatives à un usage professionnel. Il est en effet reconnu que l'usage des dessins et les modes de raisonnements visuo-spatiaux des experts sont différents de ceux des novices. La durée de l'expérience, limitée à quelques heures, ne nous permet pas de comprendre les impacts sur l'activité à long terme, les modes d'apprentissages de l'utilisation du système ni, les stratégies de détournement ou de compensation mises en place par les utilisateurs dans la durée.

L'étude de l'activité de remise au net nous a cependant permis de mieux appréhender l'activité de conception préliminaire par dessins d'esquisses en architecture. Les différences observées entre les conceptions réalisées sur papier et avec les logiciels que nous développons nous permettent aujourd'hui de mieux comprendre les contraintes propres au dessin d'esquisse numérique et à l'interprétation du croquis. Elles ouvrent aussi la voie à cerner des opportunités d'assistance à la conception, et les modalités de cette assistance.

6.1. Différents types d'esquisses et modes de transformations

Notre étude, à la suite de la précédente, a montré que la phase dite d'esquisse est caractérisée par des productions graphiques variées. Il n'existe pas qu'une seule esquisse en conception préliminaire, mais bien deux : l'esquisse de brouillon (ou conceptuelle) et le dessin net (ou esquisse synthétique).

L'esquisse conceptuelle permet de **concevoir sans choisir**. L'architecte, grâce à l'imprécision et au flou du croquis, ne fige pas son projet mais au contraire autorise la coexistence sur un même dessin de plusieurs solutions parfois contradictoires. À l'heure actuelle, ce genre de mécanisme n'est pas possible dans les outils de CAO/DAO classiques qui contraignent l'utilisateur à manipuler une solution unique qui va évoluer jusqu'à la fin de la conception (Juchmes *et al.*, 2004). Au point de vue graphique, l'esquisse conceptuelle, au contraire de ces modèles, est floue, complexe, ambiguë et saturée d'informations parfois contradictoires. Ces caractéristiques la rendent extrêmement personnelle : elle est difficilement interprétable par un agent extérieur et donc, à fortiori, par un système informatique. Support d'exploration, elle sert principalement voire exclusivement le concepteur.

La mise au net permet de **choisir**, sans nécessairement concevoir. Elle permet de passer d'une représentation où de multiples solutions coexistent, à la représentation d'un objet architectural unique. Il s'agit donc de choisir la meilleure option dans l'ici et maintenant de la conception. Cependant, l'esquisse synthétique n'est pas une représentation figée de l'objet architectural : le dessin mis au net est un instantané à un moment de la conception. Son objectif est de permettre la communication des principales caractéristiques du projet en cours de manière un peu plus univoque, grâce à des mécanismes simples de réduction de l'ambiguïté et de l'incertitude ainsi que des procédures de vérification, tout en étant ouvert au prolongement des idées, à leur critique et leur modification, donc à la continuation de la conception. Cette communication est à destination d'un collaborateur ou du concepteur lui-même. Ce type de dessins convient à l'interprétation par un logiciel. La mise au net ne consiste cependant pas uniquement en une duplication de certains traits, elle peut s'accompagner d'une explicitation du projet (réduction de l'ambiguïté) par exemple en ajoutant des légendes au dessin.

Lors de la mise au net, il n'y a pas de modification de la topologie des espaces et de la forme, ni d'ajout ou de déplacement d'un élément architectural. C'est-à-dire qu'il n'y a pas de génération de solutions nouvelles à cette étape, mais un choix parmi les nombreuses solutions qui existent. Cela ne signifie cependant pas que la mise au net est indépendante de la conception. Choisir de redessiner ou de surligner, choisir une échelle de dessin, changer de couleur de trait, sont des actes qui participent activement au processus mais pas par une action directe sur l'objet projeté. La mise au net fournit un instant lors duquel l'activité du concepteur est essentiellement dirigée vers une reformulation du problème : en effectuant ces opérations de mises au net, le concepteur se recrée un nouveau cadre, moins ambigu et plus précis, sur base duquel il va pouvoir continuer à générer des solutions et les évaluer.

6.2. Influences de l'interprétation du dessin et de la 3D sur l'activité

Les dessins synthétiques produits pour le dialogue avec le modèle comportent toutes les caractéristiques du dessin « net » présent sur papier-crayon. Mais il est indéniable de constater que l'interprétation du croquis numérique, ainsi que la création en temps réel d'un modèle 3D, influencent fortement l'activité graphique, et en particulier la mise au net.

- Lorsqu'un système informatique interprète le dessin, **la mise au net change de nature**. Pour bénéficier d'un modèle virtuel 3D utile, il est nécessaire de proposer au logiciel une représentation unique du bâtiment, qui soit complète, cohérente et suffisamment précise pour être comprise par le système. Cette contrainte supplémentaire implique que la mise au net change de nature. D'une part elle comprend les opérations de mises au net classiques liées à la reformulation du problème pour le concepteur : réduction de l'incertitude et précision des dessins. Mais d'autre part, la mise au net constitue plus que le recopiage et les choix observés dans la mise au net : elle implique de convoquer les processus cognitifs de vérification de la cohérence de l'objet, en vue d'avoir un unique modèle complet et cohérent pour l'interprétation, donc une forme d'évaluation de la solution.
- **La mise au net change aussi de temporalité** avec la présence d'une interprétation. Les contraintes de génération du modèle impliquent que ce dernier soit complété et précisé à des moments spécifiques, durant les « phases » observées de mise au net. Ces phases sont des étapes de validations et d'évaluations explicites, notamment sur base de la 3D.
- Par ailleurs, **l'interprétation modifie aussi en partie le lieu de simulation** : alors que les dessins nets et de brouillon sont entremêlés sur les plans papier, ils sont séparés, ou à tout le moins en partie, sur les calques électroniques d'EsQUIsE. Ceci provient aussi sans doute du fait qu'il est important de produire un modèle « épuré » pour faciliter l'interprétation logicielle.
- En outre, la présence d'une interprétation induit chez le concepteur un **focus très fort sur le modèle 3D**, structurant en partie son activité. La structure temporelle de l'activité, l'utilisation des calques, les modalités de propagation des contraintes et la conception des différents étages (voir étude 1) sont centrées sur la présence de ce modèle. L'activité est réorganisée pour y intégrer ce nouveau type d'information. Les évaluations prennent notamment lieu de manière explicite, sur base du modèle, dans des « phases » dédiées. Ce constat a déjà été réalisé par Lim (2003) qui, sur base d'une analyse des temps de travail associés aux différentes représentations utilisées par le concepteur sur papier-crayon et sur croquis numériques augmentés par la visualisation 3D, constate que les proportions de temps de travail sur différents types de représentations (plans, coupes, etc.) sont modifiées. En particulier, la modélisation 3D générée mobilise une proportion conséquente de l'activité.

6.3. Influences des interfaces-esquisses sur l'activité graphique

Tout d'abord, soulignons que l'utilisation d'interfaces-esquisses est une voie prometteuse pour soutenir la conception. En effet, notre étude montre que le caractère numérique du croquis ne change pas fondamentalement ses caractéristiques intrinsèques, ni son utilité : on retrouve globalement les mêmes caractéristiques des dessins et les mêmes procédures et comportements de mise au net. La transposition dans un environnement numérique offre en plus l'avantage de l'augmentation du croquis. Ainsi, outre les augmentations liées au papier numérique, comme les fonctions d'édition et de manipulation (le zoom et la translation permettent de disposer d'une feuille de taille virtuellement infinie), les logiciels que nous développons proposent deux types d'augmentations : des évaluations précoces de performance sur base d'une interprétation dans le cas d'EsQUIsE et un partage du dessin à distance et en temps réel dans le cas de SketSha (qui n'a pas été exploité ici). Garder des modes d'expression naturels tout en profitant d'augmentations numériques est un défi qui semble réalisable dans le domaine de la conception.

Cependant, l'approche numérique présente certaines limites. Tout d'abord, nous avons montré que le dessin numérique, s'il contenait une quantité d'informations comparable au dessin papier, était composé de moins de traits avec moins de variations et que, spontanément, les concepteurs étaient moins expressifs dans leurs productions graphiques. Il semble assez clair que les

potentialités graphiques sont réduites dans les environnements logiciels utilisés ici. Ainsi, les environnements numériques avec leurs contraintes propres permettent de soutenir efficacement le dessin synthétique, mais moins le dessin conceptuel. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Koutamanis (2005) qui, en étudiant l'utilisation du stylo numérique Anoto⁶⁴ dans le cadre de croquis d'architecture, constate que les possibilités d'expression graphique plus réduites rendent l'esquisse numérique mieux adaptée aux dessins abstraits comme les plans ou les diagrammes, c'est-à-dire aux esquisses synthétiques, qu'aux esquisses plus artistiques (ou conceptuelles). A noter que certaines fonctionnalités du système permettent en partie de compenser cette perte des potentialités graphiques. En effet, la transparence paramétrable, très utilisée dans la palette graphique, permet au concepteur d'afficher plusieurs dessins en même temps. Le logiciel offre aussi la possibilité de rendre les calques totalement transparents. Ainsi, il est possible de véritablement fusionner plusieurs dessins, et pas uniquement de les superposer. Ainsi, de nombreux dessins peuvent être affichés, même s'ils sont plus « pauvres ». Soulignons aussi que cette limitation de l'expressivité est aussi due au dispositif matériel dans lequel les activités ont pris place. Le Bureau Virtuel possède une grande taille et, en corollaire, sa résolution est moins bonne que sur d'autres dispositifs tels que les tablettes-écran (qui, pour certaines, possèdent la même résolution que le Bureau Virtuel pour une taille proche de l'A3). D'autres dispositifs et applications de dessin proposent des solutions plus précises, plus fines et plus expressives, mais ne sont généralement pas accompagnées d'augmentations.

Ensuite, une de nos observations les plus surprenantes est la disparition progressive du dessin conceptuel dans l'activité sur environnement numérique sans interprétation. Après environ la moitié de l'activité, les concepteurs ne tracent plus que des croquis synthétiques exclusivement. L'activité d'exploration graphique, importante en conception, semble donc être en partie réduite. La génération de solutions semble être plus mentalisée. Nous interprétons ce constat par l'effort qu'implique le dessin numérique. Ce comportement de réduction de l'activité de dessin des utilisateurs peut être interprété par un rapport en coûts-bénéfices.

Dans les activités papier-crayon, le croquis est peu coûteux. Les outils sont « naturels », habituels, invisibles et permettent l'immédiateté de la transcription des pensées du concepteur. Celui-ci externalise l'essentiel de sa pensée, à faible coût, et cela se traduit par un nombre de dessins et de calques plus importants que dans les deux environnements.

Sur les deux environnements numériques, l'activité de dessin est plus coûteuse. La réduction de l'expressivité graphique, évoquée à plusieurs reprises, rend les dessins plus compliqués à effectuer (en témoigne le nombre de traits moins importants sur les deux espaces numériques, pour le même type de dessins). Nous faisons l'hypothèse que l'impossibilité de s'exprimer de manière totalement libre engendre un effort pour maintenir une esquisse « lisible ». La nécessité de réduire le nombre de traits compte tenu des limitations des systèmes implique une activité supplémentaire de supervision de l'activité de dessin. En outre, la grande taille de l'espace de travail est aussi un facteur d'effort physique supplémentaire.

Sur la palette graphique, lorsque le problème est entièrement ambigu, au démarrage de la conception, le concepteur esquisse de nombreux dessins, du même ordre que ce que l'on observe lors des activités papier-crayon. Les bénéfices de l'externalisation (décomposition graphique du problème, fourniture d'indices visuels pour la réinterprétation et l'émergence du concept, aide mnémotechnique, etc. voir chapitre 2, point 3.3) semblent donc compenser ce coût lié au dessin numérique. Mais dès que les grandes lignes de l'objet sont définies, l'activité de simulation graphique diminue jusqu'à disparaître complètement. A ce stade, le coût qu'engendre le tracé de

⁶⁴ Le système Anoto est un dispositif comportant une pointe de stylo ordinaire, permettant de tracer des dessins sur papier, et une caméra enregistrant le dessin dans un environnement numérique au fur et à mesure de son tracé.

dessins de brouillon est supérieur aux bénéfiques qu'ils apportent au concepteur. Or, les êtres humains ont une tendance naturelle générale à effectuer l'activité cognitive là où elle est la moins coûteuse d'un point de vue cognitif (Kirsch, 2010). Dès lors qu'il n'y a pas de valeur ajoutée au croquis conceptuel numérique, celui-ci tend à disparaître, au profit d'une activité plus mentalisée. A noter que cette perte d'informations du croquis conceptuel est en partie compensée par d'autres stratégies de gestion de l'information, notamment par un usage massif de la transparence.

Les croquis synthétiques, par contre, continuent d'exister. Contenant une information d'une plus grande précision que les esquisses conceptuelles, ils sont indispensables à l'activité de conception. Ils permettent d'arrêter de nombreux choix de conception et ne contiennent qu'une unique solution à un instant donné. En outre, répondant au principe d'efficacité (Leclercq & Elsen, 2007), ils ne contiennent que les informations qui sont nécessaires au concepteur. Ils sont donc moins coûteux à produire et leurs apports pour la formulation du problème (l'arrêt temporaire d'un certain nombre de décisions) justifient probablement leur utilisation. Complémentaires au modèle mental du concepteur, les bénéfiques qu'ils engendrent sont supérieurs à leur coût.

Sur EsQUIsE cependant, nous ne constatons pas la disparition des dessins conceptuels, même si leur coût est du même ordre que ceux sur la palette graphique. Ceci s'explique aussi par leur ratio coût-bénéfice. Les dessins synthétiques sont en effet présents, mais ne peuvent être modifiés en permanence sous peine de modifier le modèle 3D. Les esquisses conceptuelles sont donc les seules externalisations possibles sous une forme dynamique. En outre, la mise au net des dessins synthétiques porte à chaque fois sur l'ensemble du bâtiment, pour permettre le maintien d'un modèle 3D cohérent. Dès lors, l'information à gérer pour effectuer cette mise au net est bien plus importante que dans les démarches « en escalier » et nécessite donc probablement la présence de dessins conceptuels. Enfin, comme nous l'avons vu, la mise au net sur EsQUIsE convoque des opérations différentes de la mise au net sur papier, à savoir des opérations de vérification de la cohérence et d'évaluation. Il est probable que la complexité engendrée par ces opérations justifie aussi un recours à l'esquisse conceptuelle pour gérer l'information strictement relative à la conception de l'objet architectural.

Il semblerait que la présence de l'augmentation (modèle 3D) justifie le maintien d'une activité graphique importante et ce, pour deux raisons : d'une part l'utilité des augmentations compense probablement en partie les coûts supérieurs liés au dessin et, d'autre part, les règles sous-tendant la construction du modèle impliquent une augmentation de la complexité des activités cognitives (gestion des contraintes centralisée, opérations de vérification, maintien d'un modèle unique, etc.) qui nécessitent la présence d'une activité graphique pour être menées à bien, même si le coût du dessin est important.

6.4. Modalités d'interaction dans les interfaces-esquisses

Les différentes observations que nous avons effectuées nous permettent d'apporter un certain nombre de réponses à des questions soulevées par l'utilisation d'un stylo électronique et d'esquisses numériques pour interagir avec un environnement informatique d'aide à la conception préliminaire en architecture. Nous listons cinq principes qui nous semblent fondateurs, compte tenu de nos observations.

Interpréter des croquis spécifiques

Comme nous l'avons déjà évoqué lors de l'étude précédente, il nous semble que, dans le cadre de l'interprétation de dessins, le système ne doit pas tenter de tout interpréter en temps réel. La différenciation entre les dessins nets et de brouillons, et la correspondance de ceux-ci entre le

papier-crayon et l'esquisse numérique nous invitent à penser que le paradigme de l'interprétation complète de l'esquisse de conception est peu approprié. Au-delà de la difficulté technique, l'esquisse conceptuelle étant par nature incomplète et incohérente, nos observations montrent que le dessinateur a tendance à se protéger du regard du système en utilisant des couleurs non interprétées par le logiciel jusqu'au moment où il décide de lui expliciter son travail. L'esquisse de brouillon est, et doit rester, un lieu privilégié d'exploration personnelle de solutions, sans aucune contrainte. En revanche l'esquisse nette, instrument de communication, semble particulièrement adaptée à une interprétation numérique. Les modalités d'interaction devraient être revues pour inviter l'utilisateur à dessiner librement et à tirer profit de ces esquisses synthétiques pour l'interprétation. Il convient donc de laisser une marge de liberté au concepteur dans l'organisation de son activité graphique.

Interpréter les esquisses en se basant sur la dynamique de l'activité

Pour éviter les ruptures de l'activité créative qu'impose la nécessité d'être compris par le logiciel, il nous apparaît nécessaire de tenir compte de la dynamique de l'activité de conception. Ainsi, au lieu de « forcer » l'utilisateur à modifier les rapports spatiaux et temporels qu'il entretient avec ses dessins, il nous semble plus utile de se reposer sur la dynamique naturelle du concepteur en activité. On pourrait ainsi imaginer que l'interprétation ne prenne place qu'à des moments de mise au net. Ainsi, les mouvements récurrents de conception-mise au net observables sur papier-crayon pourraient être respectés. La dynamique de l'activité de conception doit rester le propre du concepteur, afin de conserver son caractère opportuniste (Visser, 2006) qui permet une souplesse dans son déroulement, nécessaire compte tenu de la complexité des problèmes de conception. L'activité de simulation graphique doit pouvoir se dérouler sans interruption ou intervention du logiciel afin de ne pas rompre le flux continu de pensées créatives du concepteur. Les moments de mise au net ne sont en revanche pas caractérisés par ce flux continu, mais par une série de choix conscients et en partie explicites. Ils pourraient être adéquats pour opérer une interprétation.

Cette étude nous semble fournir un premier pas vers la réflexion sur une interprétation d'esquisses utilisant la dynamique du tracé. En effet, plutôt que de tenter d'interpréter toutes les traces produites (brouillons et nettes) ou, au contraire, d'imposer à l'architecte d'expliquer son dessin, un logiciel d'interprétation pourrait analyser les dessins sur base du processus de mise au net. Les temps de réflexion, les tracés précis et lents et l'utilisation de la règle, sont autant d'indices d'opérations de mise au net. L'utilisation de nouveaux calques est aussi un indicateur important. En approfondissant et en systématisant ces études de l'activité de transformation graphique, il sera peut-être possible de parvenir à un modèle dynamique de l'esquisse de conception, et d'interpréter les dessins sans contraindre ni interrompre le flux créatif de la pensée architecturale. Des études systématiques des différences structurelles entre les activités de simulation et de mise au net, basées sur l'utilisation d'un instrument de traçabilité permettant d'identifier les outils utilisés, les temps de tracé et le nombre de traits pourraient être une première étape.

Les retours de l'interprétation

Dans le cadre de la génération d'un modèle 3D, nous devons nous garder de transformer un outil de support à la conception en modèleur explicite, même si les opérations sont réalisées au stylo. Nous avons observé que la possibilité de disposer de vues 3D modifiait l'activité du dessinateur en le poussant à remettre au net l'entièreté du dessin plutôt que de travailler de manière locale, en fonction de ses besoins. Cette observation nous invite à penser que la génération du modèle 3D (et les retours d'interprétation de manière générale) ne doit être réalisée que sur demande et que ces informations complémentaires ne doivent pas être affichées à l'écran en permanence. Des études complémentaires sur l'usage de la 3D d'EsQUIsE (Mayeur, Darses & Leclercq, 2007a, 2007b ; Leclercq, Mayeur & Darses, 2007) ont montré que le modèle 3D n'est que peu utilisé par les architectes professionnels, capables de s'imaginer la volumétrie d'un bâtiment sans difficulté.

Soutenir une économie dans le dessin

Le dessin numérique, tel qu'implémenté dans les deux logiciels en tous cas, implique un certain coût physique et cognitif pour son utilisation (le coût physique étant imputable à l'environnement matériel du Bureau Virtuel). Pour permettre un soutien basé sur l'esquisse en pré-conception architecturale, qui soit utile et intéressant pour l'utilisateur et justifie donc son utilisation, il faut, d'une part, diminuer le coût du dessin au stylo électronique et, d'autre part, améliorer les bénéfices des augmentations.

Nous suggérons que les IHM à stylo pour la conception, basées sur une analogie avec les outils traditionnels, doivent soutenir les qualités essentielles que sont la fluidité, la souplesse d'utilisation et l'expressivité graphique. L'observation de l'activité sur papier montre que l'outil doit proposer différents types de traits (crayons, feutres, etc.), de différentes couleurs, sans contraindre à une sémantique particulière attachée à chaque type de trait. Le logiciel doit permettre un mode de fonctionnement de type palette graphique. L'utilisation d'une règle – réelle ou virtuelle – doit être rendue possible pour permettre les opérations de réduction de l'imprécision. Il nous semble aussi primordial de soutenir la coexistence des deux types de dessins identifiés.

Néanmoins, nos observations montrent que ce fonctionnement de type palette graphique n'est pas suffisant. Pour réellement adopter la souplesse du dessin, il est nécessaire d'offrir au concepteur des traits d'une grande variété lui permettant d'effectuer son « coup de crayon », afin de se rapprocher de la liberté d'expression graphique rencontrée sur papier, mais aussi de lui permettre de manipuler simultanément plusieurs documents en même temps. Ainsi, il nous semble nécessaire de faire évoluer l'interaction du papier virtuel, de la métaphore du carnet de croquis à celle de l'espace de dessin virtuel (Boulanger *et al.* 2005). Des réflexions sur les modalités de manipulation de documents multiples au stylo et sur la création de zones de travail différenciées (notamment dans les applications collaboratives) doivent être menées, accompagnées éventuellement de réflexions sur l'usage d'autres modes d'interactions en complément du stylo, comme les interfaces gestuelles ou tangibles.

Proposer des augmentations pertinentes

Enfin, des réflexions sont à mener sur l'*utilité* de ces dispositifs, c'est-à-dire sur les augmentations qu'ils apportent à l'activité de conception. L'utilisation d'un logiciel d'esquisse numérique sans augmentation, comme la palette graphique dans cette étude, ne présente pas réellement d'intérêt pour le concepteur, et perturbe même son activité de dessin.

Si nous n'avons pas de garantie solide quant à la pertinence de la 3D pour les utilisateurs, nos observations tendent à montrer qu'elle présente un réel intérêt pour les étudiants, qui semblent organiser toute leur activité de conception dans le but de pouvoir disposer d'un modèle 3D. Elle est manifestement une ressource pour l'évaluation de la conception dans ses aspects volumiques. Il serait néanmoins nécessaire d'approfondir l'étude des utilités de ce modèle et de son impact sur la qualité du produit de la conception. Nous n'avons en outre pas d'élément permettant d'affirmer que de la 3D présente un intérêt pour des professionnels.

Néanmoins, un des principaux atouts de l'esquisse numérique est son aspect polyvalent. L'interprétation de croquis en entrée à un logiciel est un moyen générique d'alimenter des modèles, qui eux-mêmes peuvent alimenter des évaluateurs. D'autres modes de *feedback* pourraient donc être implémentés, mais les bénéfices qu'ils apportent devront être soigneusement étudiés. Par exemple, comme nous le verrons dans l'étude suivante, les bénéfices apportés par le partage de croquis compensent une grande partie des difficultés du dessin numérique.

7. Conclusion de la deuxième étude

Cette étude nous permet de tirer des enseignements relatifs aux deux premières hypothèses de ce travail, en complément à la première étude. En particulier, notre plan expérimental permet de clairement distinguer l'impact de l'esquisse numérique (Hypothèse 1) de ceux liés à l'interprétation et à la présence de représentations auto-générées (Hypothèse 2).

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

Nos observations montrent clairement que l'activité de dessin numérique a un coût important. Fournir un stylo électronique n'est pas une condition suffisante à la simplicité, l'immédiateté et la souplesse. Le mode d'interaction qu'est le stylo électronique, les caractéristiques des environnements dans lesquels l'esquisse est tracée, la résolution du dessin et les outils disponibles sont autant de freins potentiels à l'activité graphique.

Nos observations concourent aussi à montrer que les concepteurs tendent à être flexibles dans leurs stratégies de raisonnement : leur activité cognitive prend place là où elle est la moins coûteuse.

Dans le cas présent, avec la palette graphique, l'activité de dessin à un coût important, et la simulation, plutôt que de prendre place sur des croquis, est mentalisée. Le manque de bénéfices apportés par l'esquisse numérique ne parvient pas à compenser son coût : le dessin conceptuel, c'est dire l'externalisation de la pensée « en roue libre » tend à disparaître, ce qui est potentiellement dommageable. Tirer pleinement parti de l'esquisse numérique passe donc par la réduction du coût du dessin et/ou par l'augmentation des bénéfices apportés par les environnements. En effet, l'utilisation d'EsQUIsE implique une activité graphique importante. La présence du modèle 3D, par les contraintes de sa construction, mais aussi par les atouts qu'il propose à la conception, semble donc compenser la charge impliquée par le dessin numérique.

Hypothèse 2 : les représentations générées automatiquement par un logiciel ont un impact structurant sur l'activité.

La présence d'une interprétation de l'esquisse, mais surtout les règles qui président à sa construction, ont une incidence importante sur l'activité. L'interprétation logicielle d'EsQUIsE ne semble pas imposer de contraintes sur le contenu des dessins, mais bien sur la structure, c'est-à-dire le temps et l'espace dans lesquels s'inscrit la conception :

- les moments de mise au net qui, au lieu de s'inscrire dans le cours de la conception, s'en détachent pour devenir des phases à part entière de l'activité ;
- les lieux de mise au net, l'outil logiciel invitant à dessiner les esquisses de brouillon et nettes sur des calques différents ;
- les mécanismes de la mise au net, qui mobilisent davantage d'opérations et sont plus complexes ;
- l'organisation complète des activités de dessin et de conception, qui sont centrées autour du modèle.

Cette deuxième étude vise à pousser plus loin les réflexions liées aux modes d'expression graphique en conception.

Premièrement, elle nous permet d'approfondir nos constats liés aux types de dessins identifiés préalablement. Nos observations montrent que les esquisses conceptuelles et les esquisses synthétiques ont des utilités différentes pour le concepteur, et nous permettent de décrire les opérations cognitives de la mise au net, c'est-à-dire du passage d'un type de croquis à l'autre. Nous en concluons que l'esquisse conceptuelle permet de « concevoir sans choisir », c'est-à-dire qu'elle est avant tout tournée vers la génération de solutions, alors que l'esquisse synthétique vise avant tout à opérer des choix et à réduire l'incertitude. Elle est donc tournée vers la structuration du problème.

Dans cette étude, nous avons aussi tenté de distinguer les contraintes imposées par le stylo électronique de celles imposées par la présence d'un modèle 3D. Pour ce faire, les participants étaient répartis en trois conditions : une situation papier-crayon, une situation avec le logiciel EsQUIsE et son moteur d'interprétation, et une condition sur un logiciel de « palette numérique » proposant des fonctions de dessin au stylo électronique mais sans interprétation et sans modèle 3D.

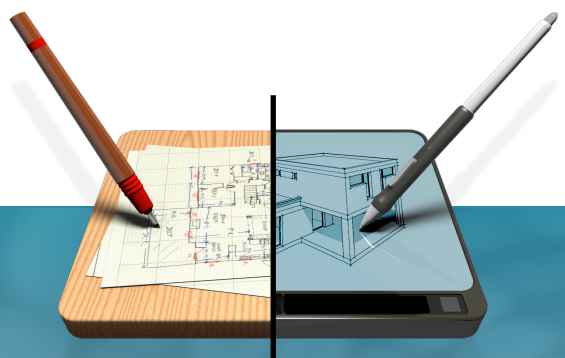
Nos résultats montrent que la situation palette graphique est comparable à ce que l'on retrouve avec le papier crayon, à une majeure distinction près. Sur la palette graphique, les croquis conceptuels tendent à disparaître, au profit d'une simulation plus mentalisée. Nous interprétons cette observation par un principe de flexibilité cognitive dicté par une tendance à l'économie : l'activité cognitive prendrait place là où elle est la moins coûteuse. Les environnements au stylo électronique portent en eux un certain nombre de contraintes qui rendent le dessin numérique plus ardu à tracer. Celui-ci tend donc à se réduire à mesure que l'avancement de la conception le permet, c'est-à-dire que l'objet architectural se précise et perd en ambiguïté.

Avec le logiciel d'interprétation de dessins, les comportements des concepteurs sont tout autres. S'il n'y a pas de chute significative de l'activité de dessin, celle-ci par contre s'organise presque entièrement autour de la construction du modèle. L'organisation des croquis sur les différents supports (calques), les moments, activités et objectifs de la mise au net de dessins et l'organisation temporelle de l'activité sont clairement différents des deux autres environnements. Le modèle 3D et l'interprétation des esquisses structurent donc entièrement l'activité de conception.

Fort de ces constats, nous proposons des pistes pour les environnements d'esquisses numériques visant à soutenir la conception.

CHAPITRE 6

Troisième Etude
Utilisation de l'esquisse numérique comme
instrument de collaboration distante



1. Objectifs

L'objectif de cette étude est d'étendre nos réflexions sur les rôles, contraintes et bénéfices des interfaces-esquisses dans le champ de la conception. En l'occurrence, nous nous intéressons à l'utilisation de la modalité graphique comme instrument de communication et de collaboration distantes. Les deux études précédentes, centrées sur l'utilisation de l'esquisse numérique dans une perspective individuelle, ont montré que l'utilisation du dessin répond à un principe de flexibilité, sous-tendu par une tendance à l'économie cognitive. Ce principe affecte l'organisation même de l'activité de conception. En conséquence, nous avons conclu que, pour l'utilisateur, les augmentations apportées doivent être plus importantes que le coût du dessin sur espace informatique. Nous cherchons ici à identifier les coûts du dessin en tant que modalité graphique de la communication à distance, et les bénéfices du partage de dessins et de représentations en temps réel sur des postes de travail distants. Cette étude a aussi pour objectif de mieux comprendre les processus collaboratifs menés à distance, et principalement l'apport de la modalité graphique pour les soutenir.

Lors du développement des dispositifs d'esquisses numériques, et notamment du Studio Digital Collaboratif⁶⁵ (SDC), les professionnels du monde de la conception que nous avons rencontrés ont montré un vif intérêt à pouvoir partager des documents et les annoter à distance. Les premières études d'usage de ce système, aussi bien avec des étudiants (Safin, Verschuere, Burkhardt & Détienne, 2010 ; Kubicki, Bignon, Elsen, *et al.*, 2008 ; Kubicki, Bignon & Leclercq, 2008) que des professionnels (Safin & Leclercq, 2009), ont démontré la pertinence et l'utilité du partage de dessins en temps réel. Ces études ont également montré que l'outil est principalement utile, non pas dans des activités d'idéation caractéristiques de la conception créative, mais surtout dans les réunions de revue de projet, c'est-à-dire lors de la coordination et de la résolution collective de problèmes particuliers et ce, via l'annotation de représentations préalablement construites par les membres du groupe. Mais aucune étude n'a véritablement investigué le coût cognitif du dessin collaboratif, sa réelle plus-value, et sa capacité à soutenir plusieurs formes et modes de collaboration.

Tel est l'enjeu de cette troisième étude. A travers l'observation de trois groupes d'étudiants collaborant à distance sur un projet pendant plus de deux mois, et se réunissant de manière hebdomadaire sur le SDC, nous cherchons à adresser deux hypothèses générales, déclinées en plusieurs sous-questions.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

Nous cherchons à savoir quelles sont les caractéristiques graphiques des annotations et dessins effectués sur SketSha. Le stylo numérique permet-il tous les styles de composition? Quelles fonctions de la communication et de la collaboration sont prises en charge par l'esquisse numérique et quelles contraintes y sont afférentes? Les modes d'expressivité de l'esquisse numérique contraignent-ils les types de fonctions pouvant être pris en charge par les annotations? Les contraintes graphiques et leurs incidences sur l'activité de conception individuelles identifiées dans les deux précédentes études sont-elles aussi existantes dans la conception collaborative?

⁶⁵ Comme décrit au chapitre 3, section 1.2, le SDC est un dispositif composé du Bureau Virtuel, du logiciel SketSha de partage de dessins en temps réel et d'un dispositif de visioconférence. Il permet d'allier le geste, la vision, la parole et la modalité graphique pour fournir un environnement multimodal de collaboration à distance.

Hypothèse 3 : l'esquisse numérique, en tant que modalité particulière de communication distante, permet de soutenir des versions « fortes » de la collaboration.

L'esquisse numérique est utilisée ici en tant que modalité de communication à distance. Sa présence permet d'enrichir les canaux de communication, et donc de soutenir une collaboration plus proche de celle observable en coprésence. Notre hypothèse est que la mise à disposition d'un environnement permettant l'usage de cette modalité de communication originale va fortement influencer les modes de collaboration mis en place dans les groupes. En particulier, nous nous attendons que le dispositif enrichisse le processus et pousse les utilisateurs à adopter des versions fortes de la conception collaborative, c'est-à-dire de mettre en place des activités de type co-conception.

En outre, cette hypothèse générale est déclinée en plusieurs sous-questions relatives à l'usage spontané de cette modalité dans le processus de conception collaborative.

- Quelle est la place de l'esquisse numérique en tant qu'outil médiateur de la décision collective ? Quel est son statut par rapport aux autres modes de représentation et d'échange ?
- En quoi est-elle un vecteur d'une collaboration de qualité ? Permet-elle de soutenir plusieurs modes de collaboration ou impose-t-elle une structure dans les échanges ?
- Quel est son rôle en tant que modalité graphique de la collaboration ? Quelles sont les différentes fonctions que le dessin numérique, et l'annotation numérique, permettent de remplir dans les processus de conception et de collaboration ? Cette modalité facilite-t-elle le partage de points de vue et la construction d'une connaissance partagée ? Est-elle utilisée pour suppléer à certaines déficiences des autres modalités d'échange dans la conception ? Quelle est la plus-value de l'utilisation de l'esquisse numérique pour des activités de travail collectif à distance ?

Nous observons aussi l'esquisse numérique en rapport aux autres modes de représentations que sont les plans DAO, les images, les modèles 3D, etc. Nous cherchons à identifier les rôles de ces représentations en regard de celui du croquis numérique, et cherchons à comprendre les complémentarités qu'entretiennent les annotations numériques avec ces différents types de productions.

A l'instar des deux études précédentes, nous adoptons une démarche d'exploration et de description d'usages, dans une situation « écologique », plutôt qu'une démarche de laboratoire, nécessairement réductrice.

2. Dispositif

Cette étude est aussi d'ordre qualitatif, bien qu'elle fasse appel à certaines données quantitatives. L'objectif est d'observer des pratiques spontanées dans une situation éducative ayant la particularité de s'inscrire dans la durée.

L'étude se situe dans le cadre d'un atelier de conception architecturale collaboratif à distance, réunissant des étudiants de premier Master Ingénieur-Architecte de l'Université de Liège (Belgique) et des étudiants de deuxième Master en Design Global de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (France). Trente étudiants, dix-sept en Belgique et treize en France,

répartis en six groupes de cinq (trois belges et deux français, ou deux belges et trois français), sont chargés de concevoir, de manière collaborative, un centre culturel. Pour ce faire, les étudiants collaborent pendant environ trois mois. Une journée par semaine est allouée à l'atelier pour les étudiants liégeois, et deux jours par semaine pour les nancéiens. Ces derniers, compte tenu du créneau temporel plus important qui leur est alloué, sont en charge de la réalisation des modèles et représentations les plus complexes.

Le programme (disponible à l'annexe 2) définit les grands axes suivants.

- Le centre culturel est réparti sur deux sites, un à Liège et un à Nancy. Il s'agit donc de concevoir symboliquement un seul bâtiment réparti sur deux implantations, ou deux bâtiments avec des liens importants entre eux, du point de vue architectural.
- Ces sites sont réels. Le site liégeois est bien connu des étudiants belges, et le site nancéien a été visité par tous.
- Les différents espaces à concevoir (bureaux, bar, amphithéâtre, espaces de stockage, etc.) sont définis précisément, avec certaines indications de surface.
- Il n'y a pas de contrainte budgétaire, comme habituellement dans ce genre d'exercice.

Pour réaliser l'exercice, plusieurs outils sont à disposition des étudiants.

- Une plate-forme d'échange et d'indexation de documents, le CRTI-Web (Kubicki *et al.*, 2009, Kubicki, Bignon, Elsen, *et al.*, 2008 ; Kubicki, Bignon & Leclercq, 2008). Elle permet de déposer et retirer des documents et fournit une nomenclature automatique à ces documents. En ce sens, elle est un dispositif structurant pour la collaboration (*ordering system*, Schmidt, 2004).
- Une séance hebdomadaire sur le Studio Digital Collaboratif, d'une durée d'une heure par groupe. Ce dispositif est un environnement multimodal de collaboration à distance (voir chapitre 3, section 1.2 pour les détails).
- Les étudiants sont en outre autorisés à utiliser d'autres moyens de communication (téléphone, courrier électronique, *chat*, etc.) s'ils le jugent nécessaire.

Afin de mener à bien cet atelier, certaines consignes leur sont données sur leurs modes de collaboration. Un ordre du jour doit être établi avant chaque réunion et chacun des participants doit endosser un ou deux rôles, parmi les huit suivants : Composition architecturale, Architecture d'intérieur, Structure/Enveloppe, Cibles HQE (haute qualité environnementale), Eclairage/Acoustique, Techniques spéciales et Responsable des échanges (responsable des communications au sein du groupe).

Le corps enseignant encadre l'atelier de manière complémentaire. Les deux professeurs en charge du cours font office de maître d'ouvrage : ils commentent les productions des groupes à des moments clés et supervisent les évaluations. Deux assistants encadrent la conception au jour le jour : lors de chacune de leur séance de travail sur SDC, les étudiants sont accompagnés par deux encadrants assistants, un à Liège et un à Nancy, qui ont pour mission de répondre aux questions des étudiants, de les conseiller, de critiquer leurs propositions, etc. A noter que le dispositif en est à sa quatrième édition. Les aspects logistiques, organisationnels et pédagogiques sont donc bien maîtrisés par les enseignants.

Au total, les rencontres des étudiants s'élèvent au nombre de douze. La première séance introductive s'est déroulée en coprésence, à Nancy. Elle avait pour but la visite du site, la présentation des consignes et la formation des groupes. Deux séances formelles ont pris place avec l'ensemble des étudiants (dans les deux salles de cours, communiquant par un dispositif de visio-conférence avancé) : une présentation intermédiaire des travaux de chaque groupe (PR1) et leur présentation finale (PR2). Les autres séances se sont déroulées à distance, sur le Studio Digital Collaboratif (séances SDC1 à SDC8). La deuxième de ces séances (SDC2) était consacrée à la présentation des grandes lignes conceptuelles du projet au maître d'ouvrage (MO), représenté par les professeurs en charge du cours. Entre ces rencontres, les groupes étaient libres d'organiser à leur convenance des séances de travail individuel ainsi que des échanges à distance

via les différents moyens à leur disposition (synchrones et asynchrones). Le planning est synthétisé dans le tableau 9.

Semaine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Séances plénières	INT					C o n g é	PR1					PR2
Séances en groupe		SDC 1	SDC 2	SDC 3	SDC 4			SDC 5	SDC 6	SDC 7	SDC 8	
Notes			MO									

Tableau 9

Planning de l'atelier. INT est la séance introductive (en présence). Les rencontres PR sont relatives aux présentations formelles organisées avec l'ensemble des étudiants et des enseignants (à distance). Les séances SDC ont lieu autour du Studio Digital Collaboratif et sont organisées par groupe. La séance MO est une présentation des concepts au maître d'ouvrage, représenté par les deux professeurs en charge de l'atelier.

3. Recueil de données

Nous avons recueilli des informations de plusieurs types, grâce à différents moyens. Premièrement, toutes les séances de travail sur le SDC ont été filmées par quatre caméras. Les flux vidéo ont été montés de manière à fournir une mosaïque comprenant une vue sur l'espace de travail numérique et deux vues frontales des participants sur chaque station du SDC (figure 61). Les séances de présentation ont aussi été filmées. En tout, ces données représentent environ 80 heures de vidéo.

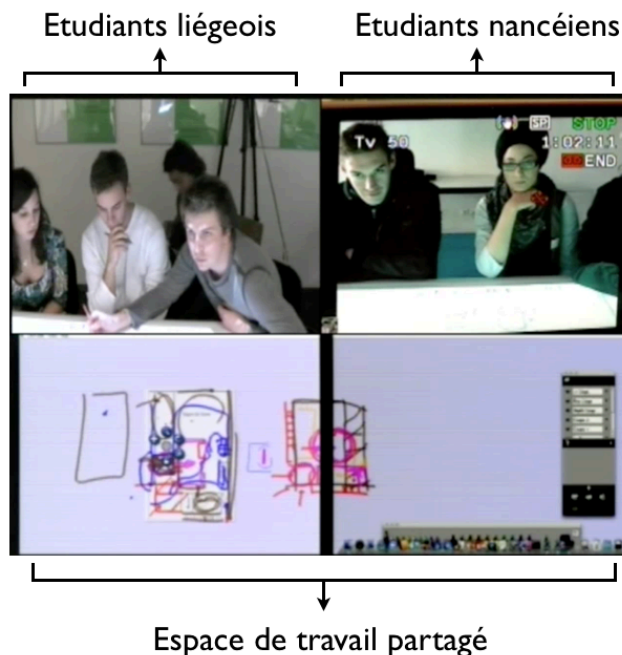


Figure 61
Mosaïque de vidéos.

Deuxièmement, à l'issue de chaque séance de travail, le fichier SketSha a été sauvegardé. Celui-ci comprend l'ensemble des documents échangés, des calques numériques et des annotations effectuées à l'aide du SDC, tels qu'ils apparaissent à la fin de la séance de collaboration. Ces fichiers ont été imprimés pour permettre l'analyse des documents et des traces graphiques⁶⁶.

Enfin, de nombreuses autres prises de données complémentaires (recueil de données automatique par fichier *log*, photographies de l'espace de travail, questionnaires, statistiques sur l'utilisation de la plate-forme CRTI-Web, échanges de mails entre les membres des groupes) ont pris place mais n'ont pas été exploitées ici, soit du fait de limitations techniques, soit car elles sortent du cadre de cette étude.

Compte tenu de la quantité de données disponibles, nous avons décidé de porter nos observations sur trois des six groupes impliqués dans l'atelier. Ces trois groupes ont été choisis pour la qualité perçue de leur collaboration en début de projet, ainsi que pour leurs différences au niveau de l'utilisation des esquisses numériques. Ainsi, un groupe vivait un certain nombre de difficultés au démarrage, un autre semblait démarrer rapidement, de manière efficace et le troisième utilisait beaucoup de dessins. Cette sélection n'a pas pour vocation d'être rigoureuse ou scientifique. Elle a été réalisée à des fins pragmatiques, afin de déterminer assez tôt quels groupes devaient être suivis.

4. Analyse des données

Nous détaillons ci-dessus les différentes analyses que nous avons effectuées sur les données.

4.1. Analyse de la qualité de la collaboration

Pour analyser le processus collaboratif, nous avons utilisé une grille développée précédemment (Burkhardt *et al.*, 2009a, 2009b), inspirée des travaux de Spada *et al.* (2005) dans le domaine du CSCL (*Computer-Supported Collaborative Learning*). Cette méthode permet d'effectuer un codage rapide des extraits vidéo, dans la mesure où il fait appel à des indicateurs subjectifs, tout en garantissant une forte fidélité inter-codeurs. Cette grille décrit la qualité de la collaboration selon six dimensions (voir tableau 10)⁶⁷. Elle comprend, pour chacune des dimensions, trois ou quatre questions à valences positive et négative, basées sur des indicateurs comportementaux. Chaque question nécessite une réponse explicite qui peut être oui, non ou oui/non et un algorithme qui permet, sur base des réponses aux questions, de calculer un score de 1 à 5 sur chaque dimension. La grille est conçue pour pouvoir analyser l'activité collaborative sur base d'extraits vidéo et de manière relativement rapide. La grille complète peut être trouvée en annexe 3.

⁶⁶ Pour les trois groupes suivis, c'est-à-dire la moitié des participants, cela correspond à 727 documents répartis sur 182 calques virtuels.

⁶⁷ A noter aussi que la grille comporte une septième dimension, orientation individuelle envers la tâche, qui n'a pas été traitée dans le cadre de cette étude.

Dimension	Définition	Indicateurs comportementaux
1. Fluidité de la collaboration	La fluidité est relative à la gestion collective de la communication verbale, de l'utilisation des outils et de l'orientation de l'attention.	Fluidité des tours de parole Fluidité de l'utilisation des outils (stylo, menus, etc.). Cohérence dans l'orientation de l'attention.
2. Soutien de la compréhension mutuelle	Il s'agit du processus de <i>grounding</i> , soit l'établissement d'un contexte cognitif partagé, concernant le problème, les actions et l'utilisation du système.	Compréhension mutuelle de l'état du problème et de la solution. Compréhension mutuelle des actions en cours et à venir. Compréhension mutuelle de l'état du système (documents actifs, fonctions utilisées).
3. Echange d'informations pour la résolution de problèmes	Cette dimension évalue la mise en commun des idées, leur approfondissement et leur cohérence.	Génération d'idées de conception (solutions, contraintes, précédents projets, etc.). Affinage des idées. Cohérence et suivi des idées.
4. Argumentation et consensus	Il s'agit de l'évaluation de l'échange d'arguments et de l'aspect consensuel de la prise de décision dans le groupe.	Critiques et arguments. Vérification de l'adéquation des solutions aux contraintes. Prise de décision commune.
5. Processus de travail et gestion du temps	Cette dimension est relative à la gestion du processus, des tâches et des aspects temporels.	Planification du travail. Division des tâches. Distribution des tâches et gestion de leur interdépendance. Gestion du temps.
6. Orientation coopérative	Il s'agit de l'évaluation de l'équilibre des contributions des partenaires dans la conception.	Symétrie des contributions verbales. Symétrie de l'utilisation des outils. Symétrie de la gestion des tâches. Symétrie des choix de conception.

Tableau 10

Dimensions et indicateurs de la qualité de la collaboration (Burkhardt et al., 2009).

Pour analyser les activités collaboratives, nous avons rempli la grille sur base d'une analyse de trois extraits de chacune des réunions collaboratives : les 10 premières minutes, les 10 minutes du milieu et les 10 dernières minutes (soit 30 minutes sur une durée approximative d'une heure par réunion). Les premières vidéos ont été analysées avec plusieurs chercheurs, en vue de s'accorder sur le codage. La suite du codage a été prise en charge par un seul observateur.

Les comportements codés sont uniquement ceux du groupe. Nous n'avons pas pris en compte les interventions et injonctions des enseignants. En effet, nous avons déjà montré dans une étude préalable que ceux-ci avaient tendance à réguler leurs comportements en fonction du mode de collaboration du groupe, pour suppléer à ses faiblesses (Safin, Verschuere, Burkhardt & Détienne, 2010 ; Safin, Verschuere, Burkhardt, Détienne, *et al.*, 2010). La prise en compte des interventions des enseignants dans l'activité collaborative risque donc probablement d'uniformiser les résultats des groupes et des séances, rendant les comparaisons moins instructives.

Toutes les séances collaboratives des trois groupes ont été analysées grâce à cet outil, à l'exception de la réunion SDC2. Celle-ci consiste, en effet, en une présentation du concept au maître d'ouvrage et n'implique donc pas d'activité collaborative à proprement parler au sein du groupe.

4.2. Documents utilisés et échangés en séances collaboratives

Une première analyse est relative aux documents échangés dans l'espace de travail collaboratif. Pour comprendre l'usage de ces documents pour la conception, nous comptabilisons les productions graphiques utilisées lors des réunions, importées dans l'espace de travail ou réalisées à l'aide du logiciel, et les caractérisons selon deux dimensions. Pour ce faire, nous avons enregistré l'état de l'espace de travail interactif (comprenant les différents documents importés et les annotations) au terme de chacune des réunions. Sur chaque calque, à l'instar de McGown, Green & Rogers (1998), nous identifions les différents dessins et les qualifions. L'analyse de ces documents est effectuée en collaboration avec un ingénieur-architecte afin de garantir la juste identification des dessins et une rigueur dans leur catégorisation. Chaque plan, chaque dessin et chaque image partagée lors des différentes session de travail⁶⁸, est caractérisée sur les dimensions suivantes : **type de document** et **type d'annotation numérique**. Cette analyse nous permet de décrire la quantité et les types d'échanges ainsi que l'usage du SDC.

La première dimension est relative au **type de document** utilisé. Nous définissons 9 catégories de documents, en fonction des outils ayant été nécessaires à leur réalisation les Plans CAO, les modèles 3D, les croquis papier-crayon, les images, les plans importés, les schémas, les textes, les maquettes et les croquis SketSha. Nous expliquons et illustrons chacune de ces caté

- **Plans CAO** : il s'agit de dessins effectués sur un logiciel de type CAO/DAO (Autocad, Archicad⁶⁹), à savoir principalement de plans, de coupes ou d'élévations. Ces représentations peuvent être très sommaires ou très détaillées.

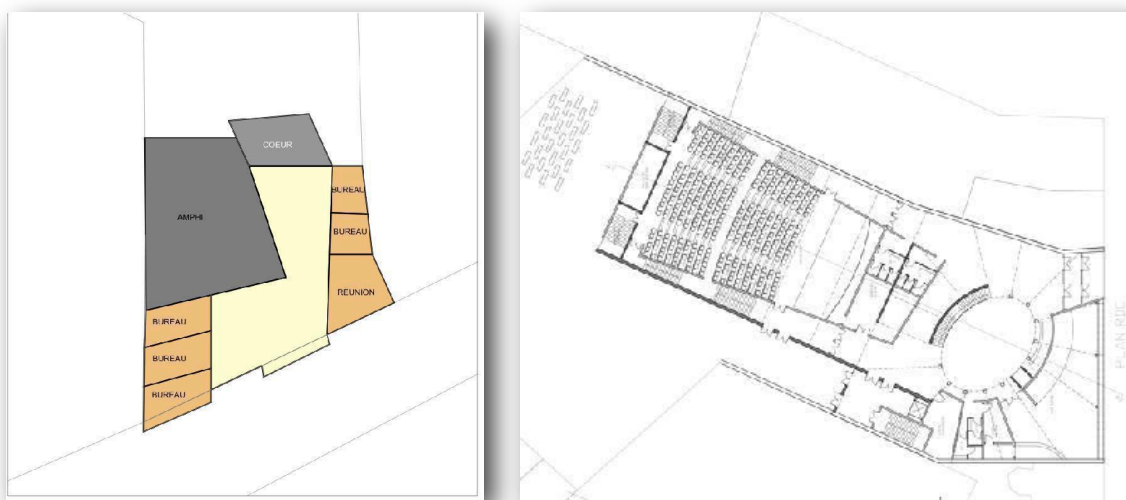


Figure 62
Plans CAO sommaire (gauche) et détaillé (droite).

⁶⁸ A noter que, suite à une défaillance technique, les documents de la première session de travail, la réunion SDC1, n'ont pas été analysés. Cependant, l'observation de ces activités nous montre que cette réunion consiste principalement en l'établissement des modes et règles de fonctionnement du groupe, et d'un cadrage par l'enseignant. Le nombre de documents échangés est très limité et le temps passé à travailler sur le problème est réduit.

⁶⁹ Par mesure de simplicité, nous ne ferons pas la distinction dans la suite de cette étude entre les outils de CAO et de DAO. Nous caractériserons l'ensemble des productions par outil de dessin informatisé sous le terme générique de CAO.

- **Modèles 3D** : ce sont les modèles 3D réalisés dans des modelers visuels de type Google SketchUp. Comme les modèles 3D ne peuvent être importés et manipulés dans l'espace de travail, il s'agit ici d'images fixes de ces modèles (captures d'écran)⁷⁰.



Figure 63
Modèles 3D sommaire (gauche) et détaillé (droite).

- **Croquis Papier-crayon** : ce sont des croquis effectués à main levée à l'aide d'outils traditionnels, puis scannés et importés dans l'espace collectif de travail.

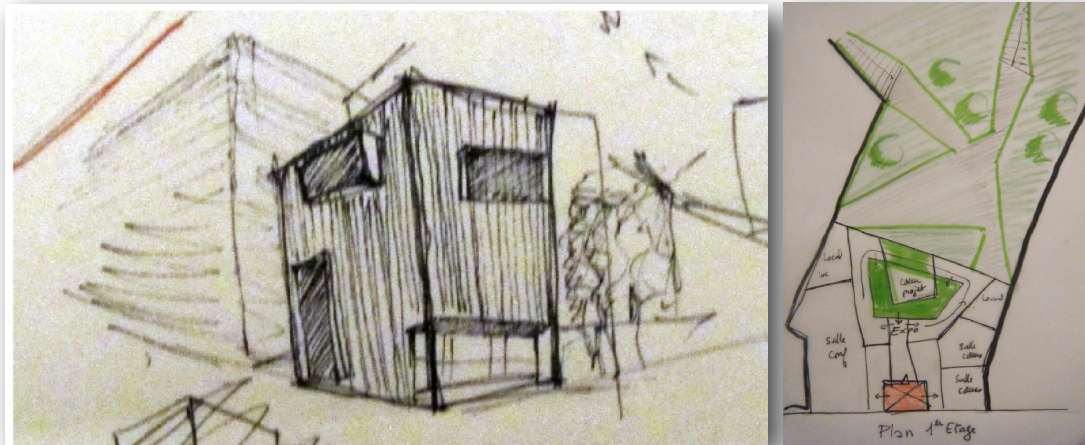


Figure 64
Croquis papier-crayon.

- **Images** : cette catégorie regroupe toutes les images non réalisées par les concepteurs mais utilisées dans l'espace collectif. Il peut s'agir de photographies aériennes du site, de photographies de bâtiments existants ou d'images d'illustrations.

⁷⁰ Par simplicité aussi, nous ferons référence à « modèle 3D » en lieu et place de « images statiques de modèles 3D ».

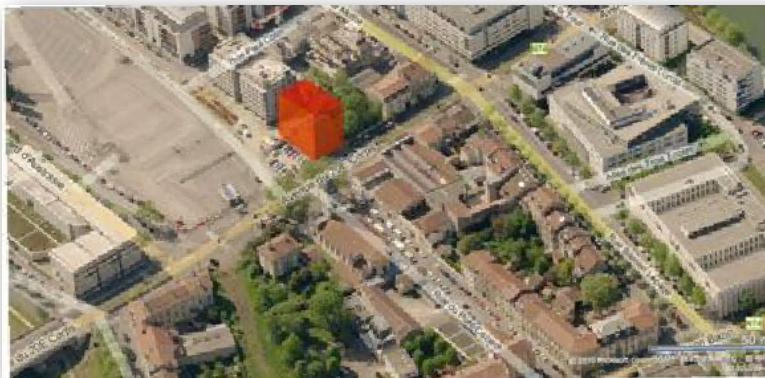


Figure 65
Photo aérienne du site (gauche) et image de référence (droite).

- **Plans importés** : il s'agit de plans non réalisés par les étudiants mais utilisés dans l'espace de travail. Typiquement, il s'agit de plans de cadastre délimitant les contours des parcelles.



Figure 66
Plan de parcelle, importé par les étudiants.

- **Schémas** : les schémas sont des représentations non analogiques d'éléments de la situation, avec un haut niveau d'abstraction. Ceux-ci sont classiquement utilisés pour figurer les adjacences entre locaux. Par commodité, nous ne distinguons pas ici les schémas effectués dans un logiciel de dessin ou à la main.

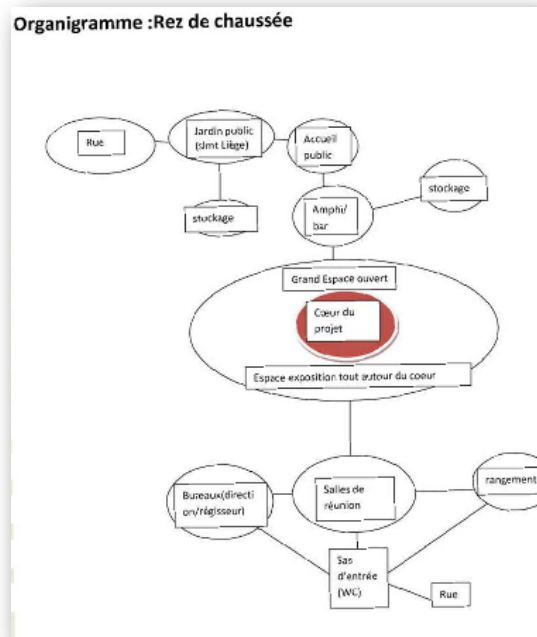


Figure 67
Schéma (organigramme)

- **Texte** : il s'agit de documents textuels ou de tableaux.

Ordre du jour de la séance du 27/10/10

- Proposition de chacun et discussion autour de la colonne vertébrale.
- Définition de la fonction, de la forme et des ambiances du coeur du projet.
- Articulation du coeur de projet avec l'espace amphi/bar et de la salle expo au rez-de-chaussée pour les 2 sites.
- Définition des matériaux et de la structure.
- Discussion autour du jardin public à Liège.
- Mise en parallèle des éléments retenus par chacun.
- Définition des principes et des idées retenues pour le projet.

Programme avec estimation des surfaces					
	Liège	S(m ²)	S(m ²)	Nancy	
PARCELLE	4925m ²		612m ²	PARCELLE	
Sous-sol				Sous-sol	
Locaux techniques(sous-sol)				Locaux techniques(sous-sol)	
Rez de chaussée				Rez de chaussée	
Accueil (WC/stockage)	50-100m ²	50m ²	50-100m ²	Accueil (WC/stockage)	
Amphi(500 places)+1 bar-scène(120 places)	+1000m ²		50-100m ²	1 bar-scène	
Espaces stockage (bar et l'amphi)	+50m ²		Max 50m ²	Espace stockage (pr le bar)	
Jardin public					
3 salles de réunions de 10p (BV)	25m ² chacune	25m ² chacune	3 salles de réunions de 10p (BV)	3 salles de réunions de 10p (BV)	
5 salles de réunions de 3p (BV)	20m ² chacune	20m ² chacune	5 salles de réunions de 3p (BV)	5 salles de réunions de 3p (BV)	
1 salle de conférence de 50p(visioconférence)	+50m ²	+50m ²	1 salle de conférence de 50p(visioconférence)	1 salle de conférence de 50p(visioconférence)	
+local de rangement (par salle)	15m ²	15m ²	+local de rangement (par salle)	+local de rangement (par salle)	
2 salles de cours de 20 places avec un mur interactif	30m ² chacune	25m ² chacune	2 salles de cours de 20 places avec un mur interactif	2 salles de cours de 20 places avec un mur interactif	
un bureau de direction	25m ²	20m ²	un bureau de direction	un bureau de direction	
de technicien/régisseur	25m ²	20m ²	de technicien/régisseur	de technicien/régisseur	
Local de rangement(matériel)	20m ²	20m ²	Local de rangement(matériel)	Local de rangement(matériel)	
un local de repos(accueil/bar)	20m ²	20m ²	un local de repos(accueil/bar)	un local de repos(accueil/bar)	
un espace d'exposition	Min 80m ²	Min 50m ²	un espace d'exposition	un espace d'exposition	
Local(ménage) par étage	25m ²	20m ²	Local(ménage)	Local(ménage)	
Espace(coeur du projet)	Min 50m ²	Min 50m ²	Espace(coeur du projet)	Espace(coeur du projet)	
Bibliothèque avec livres numériques	Min 100m ²				
Total estimation (sans jardin ext.)	+2000m ²		+700m ²	Total estimation (on aura peut être amené à mettre les salles de réunion au R+1)	
R+1				R+1	
Jardin toiture accessible(espace vert)				Étage(murs interaktif)	
				R+2	
				Local ménage	
				Bibliothèque avec livres numériques	
				Locaux de stockage	
				bureaux	
				Local ménage	
				R+3	
				Jardin toiture accessible (espace vert)	
				(Nancy) :Travailler avec des doubles hauteurs	

Figure 68
Texte (ordre du jour de réunion).

- **Maquettes** : il s'agit de maquettes tangibles, réalisées en carton. Comme l'objet est réel et ne peut donc être intégré dans l'espace de collaboration, elles sont photographiées pour pouvoir être utilisées dans l'espace de travail.

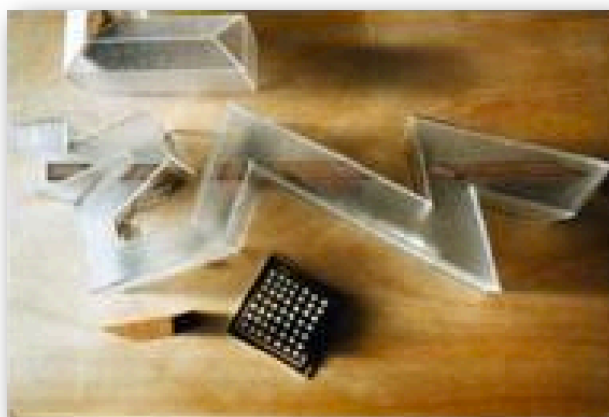


Figure 69

Photo d'une maquette, importée dans le logiciel.

- **Croquis SketSha** : ces croquis sont des dessins effectués dans l'espace de travail numérique lors de la réunion, et disjoints des autres dessins importés. Une distinction importante est à mettre en exergue. Nous n'avons considéré ici que les croquis présents sur calque virtuel blanc. De nombreuses esquisses numériques sont tracées en surimpression à d'autres documents. Ces dernières ont été classifiées en tant qu'« annotations » et font l'objet d'un codage spécifique (voir 4.3 ci-après).

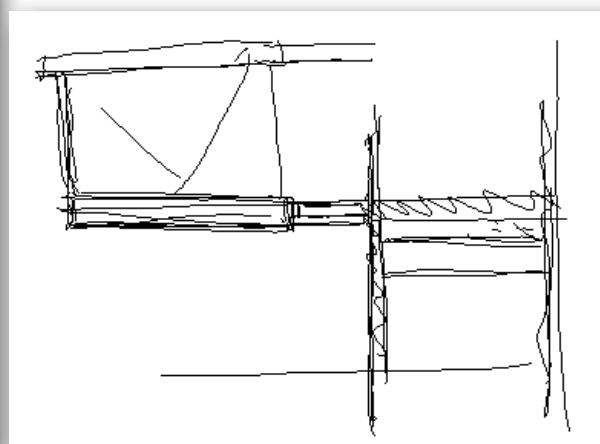


Figure 70

Croquis SketSha.

A l'exception de la dernière catégorie, tous ces documents sont préalablement préparés pour la réunion. Les modifications et annotations faites sur un document en cours de travail à l'aide du stylo numériques sont codées dans la dimension « annotations » (voir ci-dessous). Les esquisses numériques tracées sur fond blanc sont codées en tant que « croquis SketSha ».

Enfin, il est à noter que certains dessins sont mixtes, par exemple des dessins CAO ou des modèles 3D sur des photos. Pour coder ces documents, nous avons pris en compte la dernière modification faite. C'est ainsi que les dessins CAO sur photo ont été classés dans la catégorie CAO (la photo préexistant au dessin).

En guise d'illustration, nous décrivons ici les différents documents présents sur un calque.

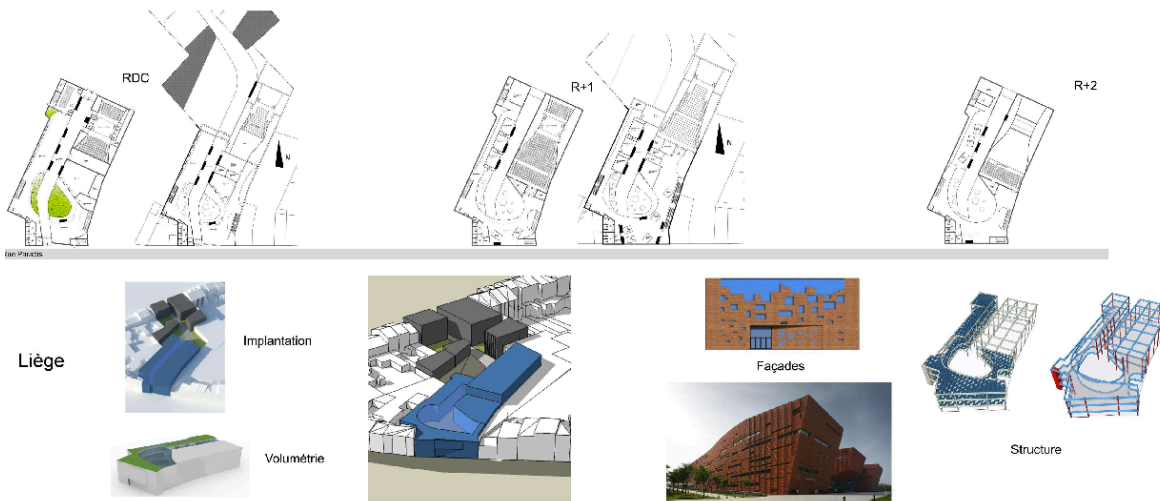


Figure 71

Calque du groupe 5 utilisé lors de la séance SDC5, tel qu'importé en début de séance. Il comprend des modèles 3D, des images de références et des plan CAO.

Chaque document est aussi classifié en fonction de son contenu, sans que cette classification n'ait été exploitée de manière approfondie. Cette description distingue d'une part le type d'informations que le document véhicule et son degré de détails (plan sommaire, élévation détaillée, coupe technique, perspective, références externes, etc.) et, d'autre part, les concepts ou éléments du bâtiment auxquels il se rapporte (implantation, ambiance acoustique, structure, aménagement extérieur, etc.). Il s'agit donc du type de vue et de l'objet. Cette classification n'est pas traitée de manière systématique mais nous permet de saisir le déroulement global de l'activité.

4.3. Présence et types d'annotations

La deuxième dimension de caractérisation est relative aux types d'**annotations** tracées au stylo électronique identifiées sur chacun des documents. Ces annotations sont faites via esquisse numérique dans le logiciel SketSha et prennent place dans le cours de l'activité de collaboration. Nous avons classé les annotations en quatre catégories. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur la classification de Boujut, Darses & Guibert (2006), qui distinguent les annotations figuratives des annotations déictiques. Les premières représentent des idées utiles dans le cours de la conception et les secondes, quant à elles, sont utilisées pour mettre des informations en évidence afin de soutenir la communication. Les auteurs classent le surlignage dans les annotations déictiques. Or, en architecture, comme nous l'avons vu dans les études précédentes, ce type de production graphique, impliqué dans la mise au net, est plus que la simple mise en avant de certains éléments. Il constitue en effet un moyen de prise de décision. Pour tenir compte de ce cas particulier, et pour étendre cette grille, nous identifions quatre classes d'annotations en fonction des liens qu'elles entretiennent avec le document sur lequel elles s'inscrivent, et qui varient sur deux dimensions (Tableau 11).

La première dimension est relative à l'**ajout de contenu nouveau** sur le document. Elle fait référence au fait que l'annotation complète ou non le document source en y ajoutant une

information n'y figurant pas à l'origine. Une flèche ajoutera par exemple, une information de mouvement alors que le surlignage n'ajoutera pas d'information spécifique au document source. La seconde dimension évalue la précision de la **correspondance spatiale** entre l'annotation et le document source. Une flèche entretiendra un rapport spatial faible avec le document : elle possède une orientation, mais son emplacement pourrait varier légèrement sans modifier le message qu'elle véhicule. Ce sera aussi le cas d'un cercle visant à identifier un élément : sa taille et son positionnement pourront varier. Par contre, le surlignage et les croquis en surimpression visant à modifier la géométrie d'espaces possèdent une correspondance forte avec le document sous-jacent : ces annotations ne peuvent être modifiées sans que le message qu'elles véhiculent ne soit changé.

	Pas de nouveau contenu	Nouveau contenu
Correspondance spatiale forte	« Surlignage »	« Géométrie »
Correspondance spatiale faible	« Pointage »	« Information »

Tableau 11

Catégories d'annotations en fonction des deux dimensions : l'ajout d'informations nouvelles et correspondance spatiale avec le document cible.

Nous classifions donc les annotations en quatre types.

- **Pointage.** Dans ce type d'annotations, un ou plusieurs éléments simples du dessin sont mis en évidence, sans qu'aucune information ne soit ajoutée. Cette mise en évidence peut être faite par exemple par un cercle entourant une partie du dessin ou par une flèche pointant un élément. Il n'y a pas de correspondance graphique stricte entre l'annotation et le dessin annoté. Nous supposons que la fonction principale de ce type d'annotations est d'effectuer des gestes de pointage à distance, c'est-à-dire de focaliser l'attention des partenaires sur certains éléments du dessin (fonction déictique).

Cible	relation survolante du bâtiement avec environnement	choix intégrés des procédés de construction	changer à table naissance	gestion énergie	accès de l'eau	gestion des déchets des activités	entretien et maintenance	confort hygrothermique	confort acoustique	confort visuel	confort tactile	conditions sanitaires	qualité de l'air	qualité de l'eau
Performance ++				x						x			x	
Performance +					x				x		x			
Performance		x	x			x	x	x				x		x

Figure 72

Annotations de type pointage sur tableau.

- **Surlignage.** Il s'agit d'annotations graphiques superposées au document d'origine, mais n'amenant pas de nouvelle information. Ces annotations sont donc redondantes avec les images qu'elles complètent et peuvent servir à mettre en évidence certains éléments du dessin ou à fixer des décisions.



Figure 73
Annotations de type surlignage (en jaune) sur plan sommaire.

- **Informations.** Ici, des éléments graphiques simples (flèches, lignes de construction, etc.) ajoutent quelques informations sur le document d'origine, sans pour autant modifier le dessin et sans que les éléments ne soient en association stricte avec celui-ci. Ici, il s'agit donc de compléter aisément certaines informations implicites du dessin.



Figure 74
Annotations de type informations sur .plan scanné.

- **Géométrie.** Il s'agit de croquis en surimpression au document d'origine, se basant sur ce dernier. Ces dessins sont des actes de conception : ils ont pour but de modifier le document original, d'en changer la géométrie.

A noter que nous distinguons aussi une cinquième catégorie : les annotations textuelles. Celles-ci n'ont cependant été observées qu'une seule fois sur l'ensemble des productions graphiques des trois groupes observés. Nous excluons donc cette catégorie de l'analyse et discuterons de cette absence de texte dans la discussion de l'étude.

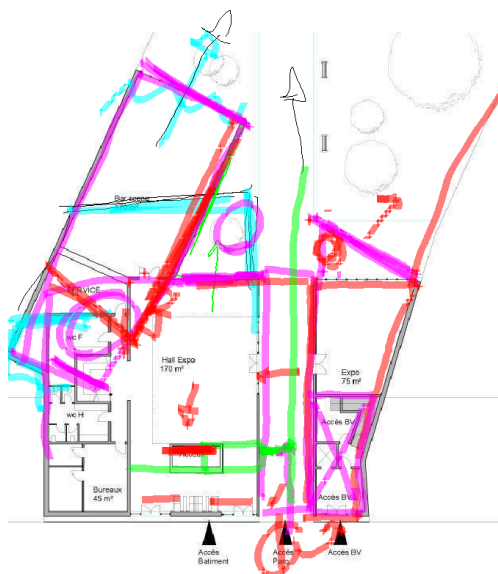


Figure 75
Annotations de type géométrie sur plan .

Ces différentes catégories sont partiellement recouvrantes. Un document peut comprendre différents types d'annotations, comme une combinaison « informations et pointage », « surlignage et informations » ou « informations et surlignage ». Cependant, la catégorie « géométrie » est plus complexe. Dans une esquisse visant à modifier un bâtiment sur un plan existant (« géométrie »), il n'est pas rare que l'on trouve des flèches, cercles, ou des surlignages. Compte tenu de la complexité de ces esquisses, il ne nous est cependant pas possible de distinguer ces différents éléments et de les coder séparément. Le codage des annotations d'un document dans la catégorie « géométrie » n'est donc jamais associé à une autre catégorie.

La figure suivante montre un calque avec différents types d'annotations sur les différents documents.

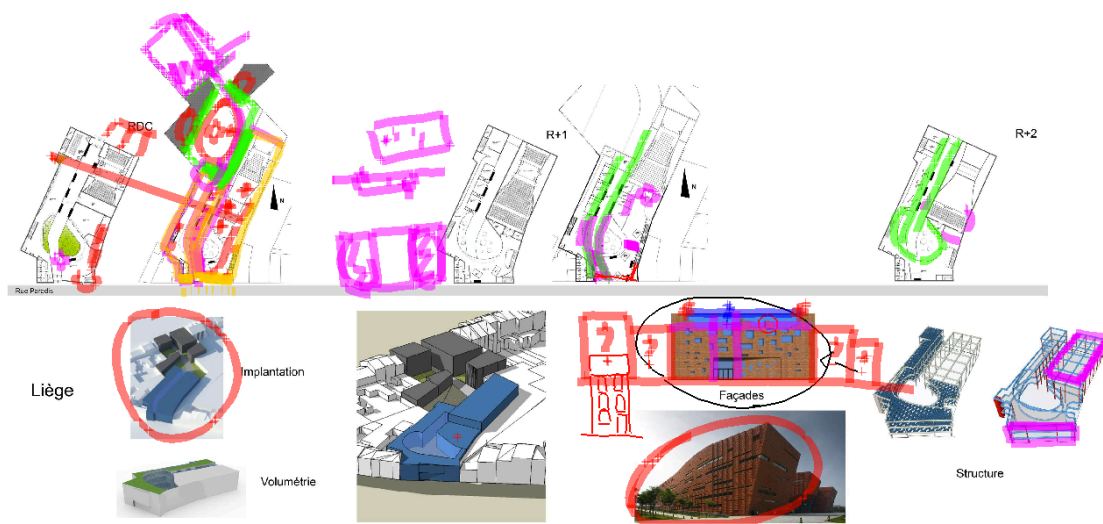


Figure 76
Calque du groupe 5 utilisé lors de la séance SDC5, tel qu'affiché en fin de séance. Les documents sont ici complétés par des annotations de type pointage (bas, gauche), surlignage (bas, droite), éléments (haut, droite), géométrie (haut, gauche) et par des croquis SketSha.

4.4. Analyse de l'activité d'annotation

Pour analyser les usages de la modalité graphique dans l'environnement numérique, nous avons sélectionné, pour chacun des groupes, plusieurs extraits vidéo, à différentes étapes de l'atelier, lors desquels les étudiants tracent tous les types d'annotations. Nous avons analysé ces extraits en collaboration avec un ingénieur-architecte.

Pour le choix de ces extraits, notre unité d'analyse est le calque. Nous avons ainsi sélectionné, pour chaque groupe, lors des réunions SDC3, SDC4, SDC7 et SDC8, deux calques comprenant les différents types d'annotations. Cette échantillonnage nous permet d'avoir une vue d'ensemble des pratiques d'annotation, sans pour autant nécessiter d'analyse exhaustive.

Nous avons observé, identifié et analysé les pratiques d'annotation en nous posant les questions suivantes, réparties en quatre groupes.

- **Fonctions des annotations.** Quelles sont les fonctions de l'annotation dans la conception et la collaboration ? Participent-elles à la conception ou sont-elles des moyens de communication ? Soutiennent-elles un discours ou existent-elles de manière indépendante ? Les différents types d'annotations permettent-ils de soutenir des activités de formulation du problème, de génération et d'évaluation de solutions ? Permettent-elles de créer un référentiel commun ou un contexte partagé ? Nous avons identifié quatre « formes » d'annotations, existe-t-il un lien entre celles-ci et les fonctions qu'elles supportent ?
- **Caractéristiques graphiques.** Quelles sont les propriétés graphiques des annotations ? Observe-t-on des constantes dans le tracé ? Comment les annotations sont-elles circonscrites dans le temps et dans l'espace ? Sont-elles effacées ? Se juxtaposent-elles systématiquement aux éléments qu'elles complètent et de quelle manière ?
- **Annotations et croquis.** Quel est le lien entre les croquis numériques (sur feuille blanche) et les annotations (croquis effectués sur base d'un dessin précédent) ? Le croquis est-il un cas particulier d'annotation ou remplissent-ils d'autres fonctions ?
- **Pratiques groupales d'annotation.** Observe-t-on des pratiques d'annotation différentes suivant les groupes ou les individus ? Quel est le degré d'appropriation collective des annotations ? Sont-elles la propriété de leur auteur ou sont-elles faites collectivement ?

Nous cherchons aussi à faire le lien entre ces annotations et les autres variables : types de dessins annotés, qualité de la collaboration et évolution temporelle du processus.

4.5. Analyses statistiques

Les analyses que nous avons effectuées sont principalement d'ordres descriptif et qualitatif. Le faible échantillon et la spécificité de l'exercice rendent difficile toute tentative de généralisation ou l'adoption d'une posture prédictive. En corollaire, au point de vue statistique, nous préférons les méthodes descriptives aux méthodes inférentielles. En effet, à l'instar de Corroyer & Rouanet (1994), il nous apparaît plus intéressant de quantifier la force des liens qui unissent deux variables, avant d'inférer leur existence réelle dans la population. D'une part, compte tenu des particularités de l'exercice, des résultats significatifs sur des statistiques inférentielles seraient difficiles à interpréter. D'autre part, les statistiques descriptives utilisées ici nous permettent également d'être plus nuancé dans nos observations : alors que les tests d'hypothèses inférentiels qualifient

majoritairement les liens entre variables de manière dichotomique (significatif vs. non significatif), les statistiques que nous utilisons permettent de qualifier la force du lien⁷¹.

Pour caractériser le lien entre variables nominales, nous utilisons le V_2 de Cramer, qui est une mesure de la force du lien entre variables nominales, et le Khi_2 , qui est une statistique visant à tester l'indépendance de ce type de variables. Afin de caractériser les liens entre les différentes modalités des variables, nous utilisons les taux de liaison, calculés à partir des tableaux de contingences.

Le V_2 est une mesure dérivée du Khi_2 , qui se situe entre 0 et 1. De manière conventionnelle, la magnitude du lien entre deux variables est considérée comme faible pour $V_2 < 0.04$, intermédiaire pour $0.04 < V_2 < 0.16$, et forte quand $V_2 > 0.16$.

Les taux de liaison (TDL) sont des écarts relatifs à l'indépendance. Ils sont calculés en comparant, pour chacune des cases d'un tableau de contingence, les occurrences réelles à des valeurs théoriques (obtenues théoriquement si les deux variables n'entretenaient aucun lien entre elles). Les taux de liaison fournissent les attractions et les répulsions entre les différentes modalités des deux variables considérées. Quand la valeur observée est inférieure à la valeur théorique, le taux de liaison est négatif et il y a alors répulsion. À l'inverse, on parle d'attraction quand la valeur observée est supérieure à la valeur théorique. Ces taux de liaison permettent ainsi de dresser une carte des liens qu'entretiennent entre elles les modalités de deux variables nominales. Il n'y a pas de seuil conventionnel, les taux de liaison fournissant des valeurs plus ou moins grandes en fonction de la grandeur de l'effet. Les seuils sont donc à choisir, principalement en fonction d'objectifs de lisibilité. Dans cette étude, nous utilisons des seuils de 0,25 ou de 0,5, selon les caractéristiques des données. Nous faisons varier ce seuil dans le but de mettre en avant les effets les plus remarquables, et non pas pour mesurer la force de ces effets, calculée par ailleurs avec les V_2 .

5. Résultats

Dans cette section, nous détaillons tous les résultats de notre étude. La première partie comprend une description globale des activités et des produits de la conception de chacun des trois groupes. La deuxième partie concerne la caractérisation de la qualité de la collaboration. La troisième partie décrit l'usage des différents documents et esquisses numériques. Pour terminer, la quatrième partie détaille les analyses de l'activité d'annotation numérique en collaboration.

5.1. Description des activités

Dans cette première section, nous décrivons, de manière globale, le produit de la conception de chacun des trois groupes étudiés, une première qualification des modalités de collaboration et un avis global sur les différents outils utilisés par les étudiants pour collaborer et communiquer. La

⁷¹ À noter que cette approche a aussi tout son sens dans une visée de généralisation : les approches inférentielles classiques ne prennent pas en compte la force du lien pour en déterminer l'existence. L'identification formelle d'un lien entre deux variables vérifiée statistiquement présentera peu d'intérêt si la force de ce lien est en réalité très faible.

description qualitative du produit est principalement basée sur les avis des enseignants recueillis lors des présentations finales du projet (notes) ainsi que lors d'un entretien avec un des encadrants. La description du processus est principalement basée sur la présentation réflexive du groupe sur sa pratique lors du jury final de l'atelier, et complétée de nos observations et des commentaires des membres du jury (lors des présentations ou durant l'entretien).

Les avis sur les outils utilisés sont exclusivement basés sur les présentations des étudiants.

5.1.1. Groupe 1

Produit

La production finale du groupe 1 est caractérisée par une idée d'installations jumelles entre les deux sites. Un atrium structurant crée un lien fort entre les deux implantations, qui sont déclinées en fonction du contexte spécifique de chaque site. La dualité entre cet élément fort et central qu'est l'atrium, et des deux espaces adaptés aux lieux, constitue une des forces de ce projet. Le produit fini, à savoir les documents et la présentation finale, aussi bien au niveau du dessin des espaces que de la qualité des rendus, est jugé très abouti, même si certains éléments ne sont pas élaborés en profondeur et ne sont pas du même niveau que le reste du projet. Le groupe obtient la note de 17/20 quant à la qualité du projet. Les figures 77, 78 et 79 montrent trois images de la présentation finale du groupe 1.



Figure 77
Modèle 3D groupe 1 - Site de Nancy - Façade vue de nuit.



Figure 78
 Modèle 3D groupe 1 - Site de Liège - Atrium et panneaux d'affichage LED.



Figure 79
 Plan groupe 1 - Site de Liège - Plan du deuxième étage.

Activité collaborative

Au sujet du déroulement de la collaboration, les membres du groupe, comme les enseignants, soulignent le systématisme important mis en place au sein du groupe. Ainsi, chaque séance sur le SDC est suivie d'une réunion en visioconférence, permettant de planifier les tâches de chacun. Le travail est ensuite individuel et les documents sont échangés par les participants avant la séance suivante sur SDC. Les étudiants insistent sur l'importance de partager les documents préalablement à la réunion SDC, afin de permettre l'implication de tous. Si des problèmes importants surgissent, les membres du groupe travaillent en sous-groupes (co-localisés) afin de les résoudre plus rapidement. Alors que la principale modalité d'échanges et de discussions pour ce groupe est le courrier électronique, les réunions sur le SDC servent principalement à présenter oralement au groupe et aux membres du corps enseignant le travail individuel de chacun. Leur travail est donc plutôt organisé en conception distribuée : des actions formelles de coordination et un travail synchrone limité à des actions de présentation, de synchronisation opératoire et de résolution de problèmes spécifiques.

Selon l'encadrant interrogé, le groupe s'illustre par une difficulté à créer une structure formelle de décision, caractérisée par une volonté d'éviter le conflit et un enthousiasme peu marqué dans le groupe. « *[Chacun] a bien sa propre idée, mais on y croit moyennement, on ne veut pas l'imposer (...). Tout le monde reste un peu sur sa faim et attend* ».

Utilisation des outils de collaboration

Les étudiants utilisent quatre outils de collaboration à des moments et pour des objectifs différents. Le tableau 12 reprend les principales caractéristiques de l'utilisation des outils de communication par le groupe 1, tel que présenté par les étudiants en fin de projet.

Outil	Fréquence	Utilisation	Points positifs	Points négatifs
SDC	1H/semaine.	Présentation mutuelle des travaux individuels. Recherches de solutions.	Modalité graphique. Immédiateté des échanges.	Principalement discussions avec les encadrants.
Visioconférence	1 ou 2x/semaine 25 min et 1 à 2 H.	Planification. Discussions sur certaines problématiques.	Immédiateté des échanges.	Pas de possibilité de modifier les représentations échangées.
Mails	Régulièrement.	Envoi de documents. Commentaires sur les documents.	Pratique courante.	Délais de réponse.
Base de données	Rarement et de moins en moins régulièrement.	Principalement pour archiver les documents finaux.		Difficultés techniques. Nécessité d'y accéder spécifiquement : ne fait pas partie de la pratique courante.

Tableau 12
Caractéristiques des outils de communication selon le groupe 1

Nous pouvons constater qu'au niveau des échanges asynchrones, le courrier électronique est utilisé comme mode principal de correspondance, sur une base régulière. En ce qui concerne les outils de communication synchrone, le SDC est préféré par les étudiants, mais souffre de deux défauts dans sa mise en œuvre : il n'est disponible qu'une fois par semaine et son utilisation est systématiquement accompagnée par la présence des encadrants, ce qui ne permet pas selon le groupe de disposer de réels moments de débat entre ses membres.

5.1.2. Groupe 2

Produit

Le projet du groupe 2 est également très satisfaisant : les étudiants vont assez loin dans l'exploitation du site, les espaces sont très bien architecturés et les volumes et surfaces sont rentabilisés pour fournir des espaces « *généreux et subtils* ». Les deux implantations sont particulièrement bien adaptées aux sites et sont articulées avec beaucoup de cohérence. Le programme est réinterprété pour fournir une réponse adéquate aux contraintes. Ainsi, l'implantation sur le site Liégeois est composée de deux bâtiments distincts. Les espaces extérieurs sont également travaillés en profondeur (voir figures 80, 81 et 82 pour des illustrations du projet). Du point de vue de l'enseignant interviewé, le groupe est allé plus loin que les autres dans les détails et dans toutes les composantes du projet. Le projet obtient aussi la note de 17/20.



Figure 80
Modèle 3D groupe 2 - Site de Liège - Implantation.



Figure 81
Modèle groupe 2 - Site de Nancy - Façade.

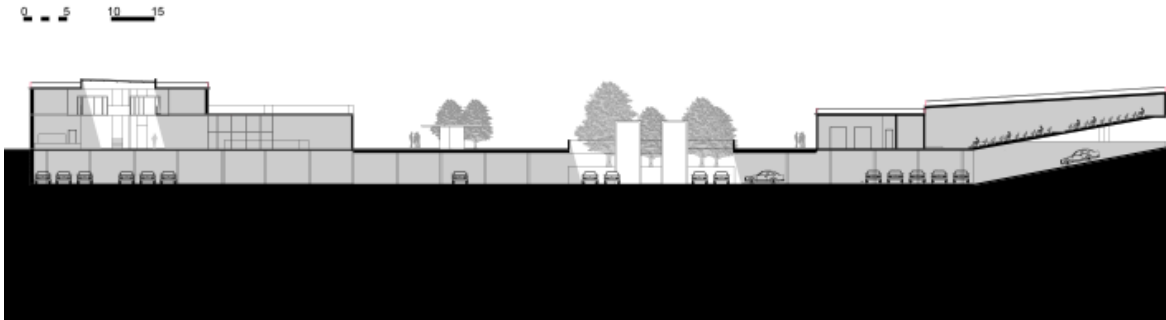


Figure 82
Plan groupe 2 - Site de Liège - Coupe transversale.

Activité collaborative

Le groupe 2 adopte une organisation plus adhocratique : très rapidement, les rôles prescrits sont abandonnés pour laisser place aux envies et se reposer sur les compétences spécifiques de chacun. Cette organisation informelle est rendue possible par la vision commune et partagée du projet qu'ont les membres du groupe et ce, dès le début de l'atelier. Cela laisse de la place à une organisation plus souple. Ainsi, au début du projet, le groupe crée une dynamique particulière : chaque réunion sur le SDC est directement suivie par la rédaction d'un compte-rendu, qui est rapidement validé via une discussion par visioconférence. Les participants travaillent ensuite en sous-groupes (les étudiants liégeois et les nancéiens), font une réunion de coordination en milieu de semaine en visioconférence, puis continuent le travail en sous-groupe avant la réunion suivante sur le SDC. Néanmoins, cette organisation évolue au cours du temps : les réunions de coordination sur visioconférence se raréfient, grâce aux compte-rendus clairs et au climat de confiance dans le groupe, et en vue d'alléger la charge temporelle. La seconde phase de travail en sous-groupe est aussi progressivement supprimée, compte tenu de l'avancement satisfaisant du projet et d'une dissymétrie dans les compétences et la charge temporelle. En effet, les étudiants nancéiens maîtrisent mieux les outils de modélisation avancés et disposent de plus de temps pour l'atelier. Ils prennent donc exclusivement en charge la production des rendus en fin d'atelier.

Le groupe adopte clairement une organisation centrée vers la co-conception : l'activité collective prend une place centrale dans l'organisation du groupe et de nombreuses procédures d'échanges permettent de prendre les décisions majeures de manière collective. Le groupe insiste sur l'importance de la confiance et de la vision commune.

La particularité du groupe, selon l'enseignant interrogé, est la forte inter-relation des acteurs. Tous les membres ont été associés au processus de conception des espaces et ont eu l'occasion de participer au dessin des bâtiments. Ainsi, le projet appartient à tous. De même, les deux implantations ont été conçues par tous les membres, et non par deux sous-groupes distincts (liégeois vs. nancéiens), comme cela s'est produit de manière généralisée dans les autres groupes.

Utilisation des outils de collaboration

Le tableau 13 reprend les caractéristiques des outils de communication selon le deuxième groupe.

Outil	Fréquence	Utilisation	Points positifs	Points négatifs
SDC	1H/semaine.	Discussions et recherche collective de solutions.	Modalité graphique. Immédiateté des échanges.	Pas de trace du discours.
Visioconférence	2x/semaine 10 min et 15 à 30 min.	Validation des compte-rendus. Discussion des travaux de sous-groupes.	Immédiateté des échanges.	Pas de trace du discours. Pas de possibilité d'agir sur les documents.
Mails	Régulièrement.	Envoi de documents. Commentaires sur les documents.	Trace écrite.	Délais de réponse variables.
Base de données	Rarement.	Envoi de documents. Commentaires sur les documents.	Trace écrite.	Nécessité d'y accéder. Peu de possibilités de commentaires sur les documents.

Tableau 13

Caractéristiques des outils de communication selon le groupe 2.

Ici aussi, les échanges par courrier électronique sont récurrents et structurants. Ils ne constituent néanmoins pas le mode privilégié de réflexion du groupe. L'avantage des échanges asynchrones pour le groupe est surtout la possibilité de garder une trace formelle du processus, des échanges et des décisions.

Le SDC est le moyen principal de communication asynchrone dans ce groupe. Bien que moins disponible que la visioconférence, il est utilisé plus intensément. Il n'est plus utilisé ici comme un moyen de présentation des travaux de chacun, portée par les échanges asynchrones, mais comme un moyen de générer des solutions et de les évaluer collectivement.

A noter aussi que ce groupe met en place des réunions en coprésence : entre deux séances synchrones en groupe, les étudiants travaillent en sous-groupes, un à Liège et un à Nancy.

5.1.3. Groupe 3

Produit

Dans le produit de la conception du groupe 3, l'aménagement intérieur est bien travaillé, notamment au travers d'un concept de « *plug* » pour l'intégration des technologies de communication et des espaces de réunion, et d'une « rue » centrale dans l'implantation de Liège. Malgré cela, le projet de ce groupe est plus faible que les deux autres.

Selon les enseignants, il manque de cohérence et souffre de nombreux défauts techniques. Les espaces ne sont pas définis clairement et sont parfois mal maîtrisés. Les productions graphiques manquent de cohérence entre elles. Le projet a été jugé comme moyen et a recueilli la note de 13/20.



Figure 83
Plan groupe 3 - Site de Liège - Plan Masse.



Figure 84
Modèle groupe 3 - Site de Nancy - Façade.

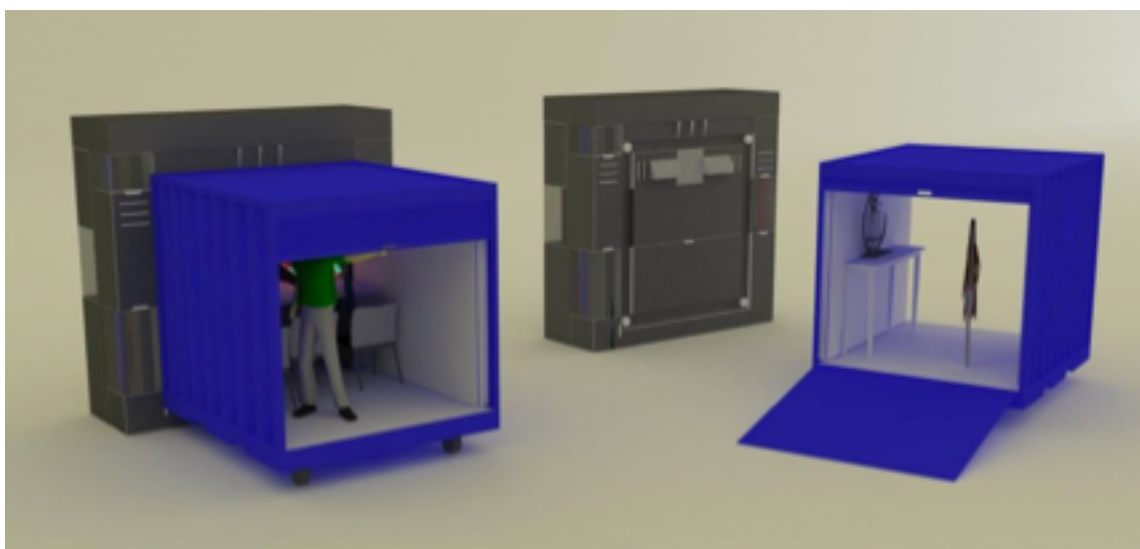


Figure 85

Modèle groupe 3 - Site de Liège et Nancy - Concept de « Plug ».

Activité collaborative

Aux dires de l'analyse réflexive de leur processus effectuée par les étudiants, la collaboration dans ce groupe a été caractérisée par un conflit d'importance, démarrant dès la seconde séance de travail synchrone et perdurant pendant l'ensemble de l'atelier. Après avoir pu mettre au point des concepts communs, les participants se sont rendu compte que l'interprétation de ces concepts étaient très différente parmi les individus, menant à de la frustration puis à un conflit. Le déséquilibre dans le volume horaire alloué pour l'atelier dans les deux écoles a clairement renforcé ce conflit, principalement polarisé entre le sous-groupe liégeois et le sous-groupe nancéen. En huitième semaine, les encadrants pédagogiques, afin de résorber le conflit et de permettre au groupe de mener la conception à son terme, ont imposé une structure de fonctionnement au groupe, répartissant les responsabilités et les tâches de manière formelle entre les membres.

Dans son organisation quotidienne, le groupe se réunit lors des séances sur SDC pour présenter leurs travaux et prendre les décisions principales. En cas de désaccord sur les propositions des individus, le groupe cherche collectivement des solutions. Au terme de la discussion, les membres se répartissent les tâches et le reste du travail s'effectue à distance (avec des échanges par mails et éventuellement une séance de visioconférence).

Ce groupe organise donc la conception en privilégiant les travaux individuels : les recherches de solutions collectives n'émergent qu'après les propositions individuelles, et seulement en cas de désaccord sur celles-ci. Le groupe communique peu de manière synchrone et semble privilégier l'échange de documents finis, et donc de décisions déjà fixées.

Selon l'enseignant, tout le dessin et toute la créativité ont été mobilisés par une seule personne, ce qui pose de nombreux problèmes aussi bien pour la collaboration, que pour le produit de la conception. Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, la situation s'est envenimée et a généré un conflit fort entre les membres du groupe ainsi que des difficultés d'ordre émotionnel. Ce conflit s'est propagé, jusqu'à générer certaines tensions entre les enseignants.

Utilisation des outils de collaboration

Le tableau 14 reprend les caractéristiques des outils de communication identifiées par le groupe 3.

Outil	Fréquence	Utilisation	Points positifs	Points négatifs
SDC	1H/semaine.	Présentation mutuelle des travaux individuels.	Possibilité d'action sur les documents. Echanges synchrones. Présence des encadrants.	Présence d'interférences dans la communication orale. Temps limité.
Visioconférence	1x/semaine puis abandon progressif.	Communication, envoi de documents.	Echanges synchrones. Possibilité d'échanger des documents.	Problèmes techniques (connexion et son). Difficulté pour les personnes étrangères.
Mails	Régulièrement.	Envoi de documents. Communication par écrit.	Trace écrite.	Communication parfois difficile et ambiguë. Pas d'accusé de réception.
Base de données	Abandon progressif de l'outil.	Envoi de documents. Principalement pour les sous-groupes.	Trace écrite des échanges. Stockage.	Nomenclature complexe des documents.

Tableau 14
Caractéristiques des outils de communication selon le groupe 3.

Ici aussi on retrouve les emails comme mode principal d'échanges. Ils sont d'ailleurs particulièrement abondants dans ce groupe. Néanmoins, les étudiants regrettent l'ambiguïté parfois engendrée par ce moyen de communication.

Les échanges synchrones sont ici réduits à leur minimum. Les séances de travail sur le SDC sont moins des moments de recherche, d'argumentation ou de prise de décision que des moments de présentations formelles. La présence des enseignants est, au contraire du groupe 1, considérée comme un atout, probablement pour leur capacité à gérer le conflit.

5.1.4. Comparaison des modes de travail des trois groupes

En synthèse, on peut dire que les trois groupes sont caractérisés par un mode de collaboration différent.

La groupe 1 met en place un processus de type « conception distribuée » : les décisions principales sont faites de manière asynchrone, puis présentées dans les séances de travail synchrone. Des questions spécifiques sont aussi résolues collectivement lors de ces séances.

Le groupe 2 met en place un processus de type « co-conception » : les décisions principales et structurantes sont prises en séances SDC, et les étudiants travaillent en sous-groupes à leur implémentation. Les échanges formels d'explication et de présentation ont lieu par mail, pour libérer du temps en séances SDC pour la prise de décision collective.

Le groupe 3 est caractérisé par la mise en place d'un processus de type « conception distribuée » et par l'émergence d'un conflit. Les séances SDC sont utilisées pour présenter les travaux de chacun et pour s'adresser aux enseignants. De nombreux échanges asynchrones ont pour but d'argumenter et de prendre des décisions, sans réel succès. Ce mode de travail est interrompu par les enseignants pour mettre en place une structure formelle de répartition des responsabilités et de distribution de la conception.

5.1.5. Analyse transversale de l'utilisation des outils de collaboration

Les trois groupes utilisent les différents outils de collaboration à leur disposition pour des objectifs spécifiques.

Les outils asynchrones sont les plus utilisés. Parmi ceux-ci, le mail a tendance à supplanter assez rapidement l'usage de la base de données. Cette dernière est jugée trop contraignante par rapport aux bénéfices qu'elle apporte. L'outil étant destiné à des professionnels, on peut supposer que la durée courte du projet et le nombre restreint de documents à échanger ne nécessitent pas l'utilisation de nomenclatures et de systèmes d'archivage complexes. Le mail, inscrit dans les habitudes des étudiants, est plus simple d'utilisation et assez réactif. Si son utilité première est l'échange de documents, il est aussi parfois utilisé pour la discussion et l'argumentation.

Les outils synchrones de communication sont le SDC et la visioconférence. Le téléphone et les systèmes de *chat* sont peu ou pas utilisés. La modalité graphique, présente sur le SDC, est jugée particulièrement utile pour faciliter la communication. Ainsi, c'est ce support qui est privilégié, même si les importantes contraintes de temps (une heure par semaine maximum) rendent nécessaire la mise en place de réunions en visioconférence en complément. Les pratiques de collaboration avec ces outils sont cependant largement différentes. Le groupe 1 les utilise pour planifier son travail, présenter les productions de chacun et coordonner les actions. Le groupe 2 les utilise pour générer des solutions et prendre des décisions collectives. Le groupe 3 les utilise essentiellement pour présenter et argumenter des décisions prises préalablement en séances de travaux individuels.

5.2. Qualité de la collaboration

L'analyse de la qualité a consisté en l'application de notre grille en six dimensions sur les extraits vidéo des différentes séances de collaboration synchrone des groupes⁷². Ces six dimensions sont (1) la fluidité de la collaboration, (2) la compréhension mutuelle soutenue, (3) l'échange d'informations pour la résolution de problèmes, (4) l'argumentation et la prise de décision, (5) le processus de travail et la gestion du temps et (6) l'orientation coopérative. Pour chacune de ces dimensions, le groupe se voit attribuer un score de 1 à 5 à chacune des réunions (voir chapitre 2, point 4.7 pour une description complète et voir annexe 3 pour le détail de la grille).

Tout d'abord, nous comparons les groupes sur le score global de qualité de la collaboration, obtenu en additionnant les scores à chacune des dimensions. Ce score, pouvant varier entre 6 et 30, donne la répartition suivante dans le temps (figure 86).

⁷² Les analyses ont porté sur l'ensemble des séances de collaboration, à l'exception de la séance SDC2, dédiée à la présentation des premiers concepts aux enseignants. Vu son objectif de présentation de contenus, nous ne pouvons pas la considérer à proprement parler comme une séance de collaboration. Pour la même raison, les présentations intermédiaire et finale n'ont pas été analysées.

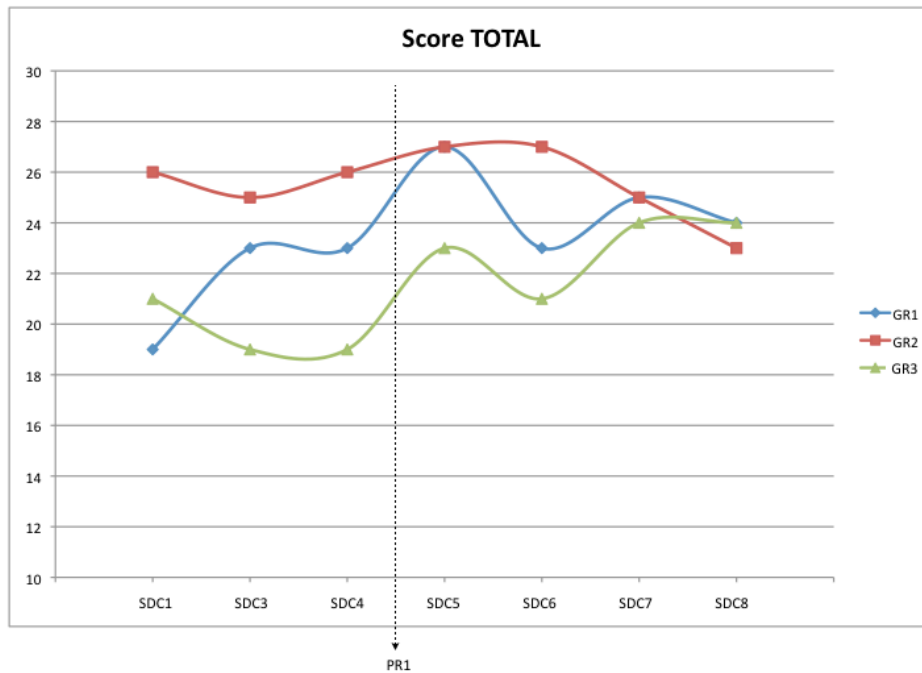


Figure 86

Score global de qualité de la collaboration pour chacune des réunions et pour chacun des groupes.

Cette figure montre que globalement, l'évolution de la qualité de la collaboration dans les trois groupes est relativement différente.

- Le groupe 1, après un démarrage difficile, arrive à collaborer de manière efficace. On constate deux pics dans leur collaboration : en SDC5 et en SDC7/SDC8.
- Le groupe 2 semble collaborer de manière efficace et ce, dès le début de l'atelier. La collaboration tend cependant à diminuer en fin d'atelier.
- Le groupe 3 éprouve globalement des difficultés à collaborer. Le *pattern* de l'évolution du score est globalement du même ordre que celui du groupe 1 : un pic en SDC5 et en fin de projet.
- Ces différences tendent à s'estomper pour les deux dernières réunions du projet, où tous les groupes ont des scores comparables, suite à une diminution pour le groupe 2 et à une augmentation pour les groupes 1 et 3.

Il est intéressant de constater que cette comparaison nous permet de distinguer clairement deux structures dans la collaboration, portées d'une part par le groupe 2 et d'autre part par les groupes 1 et 3, qui montrent le même *pattern* de collaboration, bien que les notes du groupe 3 soient inférieures à celles du groupe 1.

Le groupe 2 arrive rapidement à se mettre d'accord, et adopte une démarche de co-conception, où les séances de collaboration sont d'une importance primordiale pour avancer dans le projet. Les décisions sont prises collectivement et la collaboration est de qualité. En fin de processus, lorsqu'il est nécessaire de passer en phase de production, la qualité de la collaboration tend à diminuer : il ne s'agit plus à ce stade de co-concevoir, mais bien de se répartir les tâches pour finaliser la production des plans et maquettes, nécessaires à la présentation. A la fin du processus, le groupe met donc en place le même genre de collaboration que les deux autres.

Les groupes 1 et 3 démarrent moins bien l'atelier. Ce démarrage compliqué est expliqué par une difficulté à se mettre d'accord sur un concept commun. Les deux groupes mettent au point une

collaboration basée sur la conception distribuée : les séances de travail synchrone permettent de coordonner les actions de chacun et de résoudre les problèmes importants. La collaboration est donc légèrement moins intégrée que dans le groupe 2, ce qui explique les scores plus bas. Néanmoins, deux pics sont observés. Le premier intervient en réunion SDC5, c'est-à-dire juste après la présentation intermédiaire (PR1). On peut supposer que les *feedbacks* rendus par les enseignants lors de cette présentation, invitent les étudiants à revoir en profondeur leur projet et à s'accorder collectivement sur de grandes décisions, c'est-à-dire à adopter une démarche de type « co-conception ». Le second pic correspond à une répartition des tâches très claire pour les participants, due à la nécessité de produire les dernières représentations, comme nous l'observons dans le groupe 2.

- Pour le groupe 1, ce score correspond à peu près à la moyenne globale du groupe, témoignant d'une continuité dans le mode de collaboration.
- Le groupe 3 en revanche, obtient un score plus élevé à ce moment que lors du reste des réunions. L'intervention des enseignants, en vue de résoudre le conflit prenant place dans le groupe, permet à celui-ci d'adopter une démarche comparable aux deux autres.

Cette comparaison globale nous offre la possibilité de qualifier les groupes relativement à leur collaboration, ce qui permettra de les situer les uns par rapport aux autres dans l'usage qu'ils font de l'environnement de collaboration et de l'esquisse numérique.

Il est aussi intéressant de comparer les scores des groupes sur les différentes dimensions de la collaboration. Le tableau 15 reprend, pour chacune des dimensions, trois descripteurs :

- la moyenne générale obtenue en faisant la moyenne, pour chaque dimension, de l'ensemble des scores obtenus par tous les groupes dans toutes les séances. Elle nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur les points forts et faibles de l'ensemble des groupes dans l'atelier, et en corollaire de situer les points forts et faibles du dispositif ;
- la variance générale des scores, permettant de voir si les scores obtenus par les différents groupes lors des différentes séances tendent à être proches ou au contraire bien distincts pour chacune des dimensions ;
- les moyennes des scores de chacun des groupes, calculées sur les sept séances observées. Elles nous permettent de comparer les groupes entre eux.

MOYENNES	Fluidité de la collaboration	Compréhension mutuelle	Echange d'informations	Argumentation	Processus de travail	Orientation coopérative
Moyenne Générale	4,14	4,19	4,76	3,90	2,52	4,00
Variance Générale	0,41	0,34	0,18	0,56	0,82	1,05
Moyenne GR1	4,29	4,29	4,71	3,71	2,43	4,00
Moyenne GR2	4,29	4,29	5,00	4,14	3,14	4,71
Moyenne GR3	3,86	4,00	4,57	3,86	2,00	3,29

Tableau 15

Moyennes des scores et variance globale pour chacune des dimensions de la collaboration.

Plusieurs constats peuvent être faits sur base de ce tableau. Tout d'abord, deux dimensions sont caractérisées par des moyennes élevées (supérieures à 4) pour chacun des groupes, et par une faible variance globale : la compréhension mutuelle et l'échange d'informations. Ces résultats laissent à penser que le dispositif en lui-même favorise la collaboration sur ces dimensions. Ceci est aisément explicable par la présence d'un espace de travail partagé à distance, qui implique que tous les participants ont en commun une même vue sur l'objet de discussion. Ce n'est pas nécessairement le cas dans des réunions en coprésence, où l'espace de travail est bien plus polymorphe : les documents échangés peuvent être monopolisés par un seul participant et peuvent donc, en tout ou en partie, disparaître de la vue ou de l'attention de certains autres. Des espaces privés peuvent coexister avec des espaces partagés, voire prendre une place importante dans l'espace d'interaction⁷³. Sur le dispositif du SDC, une seule surface de travail partagée est disponible, elle est circonscrite précisément dans l'espace (à la taille de la projection) et elle offre la même vue à tous les participants. Ce partage du point de vue sur les documents permet probablement de faciliter la focalisation de l'attention des membres sur les mêmes problématiques. Elle favorise donc l'échange d'informations pertinentes au sein du groupe et favorise la compréhension des actions et des idées de chacun. En outre, on peut supposer que le dispositif pédagogique, et notamment la contrainte temporelle circonscrivant la durée hebdomadaire de travail sur le SDC à une heure maximum, invite les participants à être efficaces en termes d'échanges. Il est à noter que le groupe 2, engagé dans un processus de co-conception, a été systématiquement évalué par une note maximale sur la dimension « échanges d'informations pour la résolution de problèmes ».

La fluidité de la collaboration est également caractérisée par des scores importants et une faible dispersion, quoique dans une moindre mesure que les deux autres dimensions. Ici aussi, une explication peut être liée aux contraintes du dispositif. En effet, la visioconférence possède une limite forte : pour se comprendre, il est nécessaire de ne pas parler en même temps, faute de quoi les messages sont souvent inaudibles. Le critère de simultanéité d'Olson & Olson (2000) n'est qu'en partie présent : la simultanéité est possible quand elle est portée par des modalités différentes (parler tout en voyant l'autre réagir) mais elle n'est pas possible uniquement sur un mode verbal. Cette contrainte a toutefois un effet bénéfique sur l'activité collaborative : elle oblige les interlocuteurs à gérer de manière explicite et rigoureuse les tours de parole, impliquant une plus grande fluidité dans la communication verbale.

Une autre constatation intéressante est liée au processus de travail. Tous les groupes sont caractérisés par des scores assez faibles sur cette dimension. Le temps et la répartition du travail semblent donc peu ou mal gérés en séances de travail synchrones. Ce constat s'explique assez facilement par les contraintes temporelles du dispositif, limitant à une heure la durée des séances de travail sur le SDC⁷⁴. Compte tenu de la contrainte temporelle forte, les trois groupes ont eu tendance à différer les actions de coordination. Spontanément, ils ont organisé chaque semaine une séance de travail sur visioconférence, après la séance sur le SDC. Ainsi, les réflexions et échanges propres à la coordination du groupe et à la répartition des tâches ont pris place en dehors des séances de conception collaborative, ceci afin de tirer parti de la modalité graphique sur le SDC et de la présence de l'enseignant pour aborder principalement le « contenu » de la conception.

Enfin, la dimension possédant les plus grands écarts entre les groupes est celle de l'orientation collaborative, c'est-à-dire de l'équilibre des contributions de chacun des membres du groupe. Au regard de cette dimension, les trois groupes se comportent différemment. Les membres du groupe

⁷³ A noter que le dispositif SDC permet aussi l'utilisation de papiers ou de cahiers pour la prise de notes personnelles. Ce comportement a néanmoins été très peu observé dans les trois groupes.

⁷⁴ Cette limitation de la durée est due à des raisons d'ordre logistique : l'atelier occupait une journée par semaine dans l'horaire des étudiants liégeois, lors de laquelle six groupes devaient s'installer sur le SDC, tenir leurs réunions et suivre des séances de cours.

2 travaillent de manière très couplée et symétrique et ont un score important sur cette dimension. Le groupe 1 échange formellement des informations et présente des documents, ce qui peut expliquer que les contributions des membres ne soient pas toujours équivalentes en quantité et que le score soit intermédiaire. Le groupe 3 oriente son travail vers l'action individuelle et une proportion conséquente des choix de conception est portée par un seul individu. Le conflit dans ce groupe rend aussi les contributions très asymétriques. Cette dimension serait donc un critère discriminant pour des activités de co-conception et de conception distribuée, tout du moins dans des situations pédagogiques.

A noter aussi que l'utilisation des rôles prescrits a probablement un impact sur la symétrie des échanges. Le groupe 2, en effet, abandonne rapidement ces rôles pour mettre tous ses membres sur « un pied d'égalité », alors que le groupe 1 les utilise de manière souple et le groupe 3 de manière stricte (notamment sous l'impulsion des enseignants en fin d'atelier). Nous rappelons à ce propos que ce critère d'équilibre des contributions est plutôt adapté à ces situations pédagogiques, où les différents acteurs partagent le même niveau d'expertise. Dans des situations professionnelles, où les compétences sont complémentaires, il mériterait d'être regardé en fonction du contexte. On peut à ce titre noter que l'asymétrie dans le groupe 3 est peut-être aussi due en partie à une différence d'expertise perçue, l'étudiant mobilisant la majorité des actions de conception ayant par ailleurs une expérience professionnelle plus importantes que les autres.

Ces premiers résultats nous montrent trois profils différents de collaboration.

- *Le groupe 1 adopte une démarche de conception distribuée, où les responsabilités de chacun sont bien définies. Le travail se fait principalement de manière individuelle et est coordonné dans les séances de collaboration synchrone.*
- *Le groupe 2 s'organise par une démarche de co-conception, où les contributions de chacun sont symétriques et où l'essentiel des actions de conception (analyse du problème, génération et évaluation de solutions) sont organisées de manière synchrone.*
- *Le groupe 3 est caractérisé par une organisation décentralisée (conception distribuée) dans laquelle le groupe peine à se répartir les tâches de manière satisfaisante, et ce déséquilibre engendre un conflit dans le groupe.*

5.3. Analyse des représentations

5.3.1. Type de représentations utilisées

Rappelons que nous avons comptabilisé toutes les représentations importées, utilisées ou tracées dans l'environnement collaboratif lors de chacune des séances de travail. Nous avons classifié ces représentations en 9 catégories (voir 4.2 du présent chapitre).

Les trois groupes, sur leurs 7 sessions de travail analysées, utilisent en tout 727 représentations, soit une moyenne de 35 documents exploités par session de travail d'une heure. Si on exclut les représentations non construites par les étudiants (plans scannés et images), la moyenne est de 26 documents par session de travail. La figure 87 montre la proportion des différentes représentations.

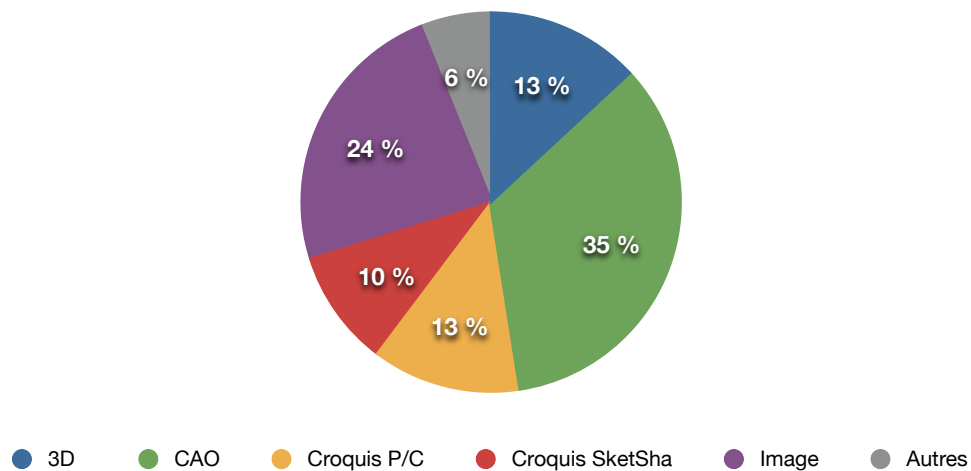


Figure 87
Proportion de l'utilisation des différents documents.

Les représentations les plus utilisées sont les dessins sur outils CAO/DAO, qui comptent pour 35% des représentations utilisées. Viennent ensuite les images (24%), puis, à niveau égal (13%), les esquisses papier-crayon et les modèles 3D. Les maquettes en carton, les textes, les schémas et les plans scannés sont utilisés de manière plus anecdotique (6% au total). Enfin, les croquis numériques réalisés sur le logiciel comptent pour près de 10% des représentations utilisées. Rappelons que ne sont comptabilisés dans cette catégorie que des dessins disjoints d'autres représentations : les croquis effectués en surimpression à des documents ont été considérés comme des « annotations numériques » (voir 4.3).

Cette première analyse globale montre la relative importance du dessin numérique dans la collaboration. Les croquis numériques (sans compter les annotations), constituent en effet un dixième des représentations échangées, alors qu'ils ne sont dessinés que pendant l'heure de travail collaboratif hebdomadaire, alors que les autres documents sont réalisés pendant l'ensemble de la semaine. Par ailleurs, cette analyse montre que l'esquisse papier-crayon est loin d'être le média privilégié pour la conception préliminaire, largement dépassée par les outils de CAO. Enfin, elle souligne aussi l'importance des sources externes, telles que les images, en tant qu'outils de référence et d'illustration des idées et des arguments.

Il est particulièrement intéressant de comprendre l'usage des différentes représentations dans le temps, afin d'aborder les évolutions dans le processus collaboratif. Le type de représentation utilisée varie en fonction du temps et de l'avancement dans la conception ($\chi^2(48) = 324,73$, $p < 0,001$). Le lien entre les deux variables est d'intensité moyenne ($V^2 = 0,09$). Le tableau 16 montre l'usage des différents types de représentations à chaque étape. Les taux de liaison, caractérisés par des attractions et des répulsions entre les différentes modalités des variables, sont indiqués par les couleurs des cases (orange pour les répulsions, bleu pour les attractions).

Une première observation est liée au nombre global de dessins. À l'approche des présentations formelles, intermédiaire et finale, le nombre de représentations tend à diminuer. En effet, de SDC1 à SDC4 (rappelons qu'une présentation intermédiaire a lieu entre le SDC4 et SDC5), le nombre total de représentations diminue très légèrement. Après une nette augmentation en SDC5, ce nombre diminue progressivement jusqu'à la présentation finale (avec une diminution totale de l'ordre de 28%). Il semble donc qu'à l'approche des *deadlines*, les étudiants tendent à restreindre le nombre de documents manipulés dans leurs séances de collaboration synchrone.

	SDC2	SDC3	SDC4		SDC5	SDC6	SDC7	SDC8		Total
Modèles 3D	3	3	12	Présentation intermédiaire	10	26	17	24	Présentation finale	95
Plans CAO	3	27	61		41	36	36	47		251
Croquis P/C	33	36	17		2	4	0	0		92
Croquis SketSha	5	18	6		11	10	13	9		72
Images	57	14	7		47	27	18	3		173
Maquettes (Photo)	0	1	0		4	0	0	0		5
Plans scannés	7	2	0		0	0	0	0		9
Schémas	3	10	0		4	0	0	0		17
Texte	3	1	1		2	1	1	4		13
Total	114	112	104			121	104	85		87

Tableau 16

Répartition des différentes représentations en fonction du temps et taux de liaison (attraction en bleu vs. répulsion en orange, au seuil de 0,5) entre les modalités de la variable « type de représentation » et de la variable « séance de travail ».

L'analyse des taux de liaison montre clairement une attraction pour les modèles 3D en fin de processus et une répulsion en début de processus. Cette observation est à mettre en rapport avec certaines affirmations quant au rôle primordial des modeleurs 3D comme support à la préconception (voir par exemple Hannibal *et al.*, 2005). Nous montrons que ces modeleurs sont largement utilisés plus tard dans le processus, afin de fournir une image plus complète et plus esthétique de l'objet à concevoir, mais sont utilisés de façon très anecdotique à l'étape créative. Cette observation peut infirmer l'idée de l'utilité de la 3D en préconception (la 3D n'est pas utilisée à ce stade), ou au contraire confirmer la nécessité de disposer de modeleurs 3D spécifiquement adaptés pour ces premières étapes (les modeleurs actuels n'étant pas adaptés, ces représentations ne sont pas créées). Nos observations en situation individuelle (voir étude 1 et 2) ont cependant montré l'intérêt pour les étudiants de disposer de modèles 3D sur base d'esquisse pour la pré-conception, en tant qu'outils d'aide à l'évaluation de solutions.

Les résultats montrent aussi que, à l'inverse des modèles 3D, les croquis papier-crayon sont exclusivement utilisés dans les premières étapes de la conception. Ils fournissent même l'essentiel des représentations construites par les concepteurs, pendant les deux premières réunions (en excluant les images et les plans scannés, non construits par les concepteurs, les esquisses occupent respectivement, 66% et 37% des productions des deux premières réunions). Dès la troisième réunion, l'esquisse est supplantée par les dessins numériques de CAO (qui représentent entre 47% et 63% des représentations produites par les groupes). Ceci est cohérent avec les recherches sur l'esquisse et les modèles que nous avons présentés au chapitre 2, section 3 : l'esquisse est avant tout un élément de simulation utile lors des phases créatives et peu avancées de la conception. Cependant, il convient de nuancer ces affirmations. En effet, les représentations dont il est question ici sont celles échangées entre les concepteurs lors des phases de revue de projet. Nos observations ne nous informent pas sur l'usage éventuel de l'esquisse papier-crayon comme instrument de simulation lors des phases de travail individuel.

Les croquis numériques sur SketSha apparaissent en quantité relativement constante lors de l'ensemble des réunions, avec une légère attraction aux réunions SDC3 et SDC7. Cela montre que le dessin à main levée reste un instrument important de la conception collaborative. Ici, l'outil n'est

pas exclusivement utilisé à des fins d'annotation, mais permet également de créer du contenu sur une page blanche et ce, à tous les moments du processus. Nous reviendrons sur l'utilité de la modalité graphique dans la suite de ces résultats, dans la section consacrée aux annotations lors des séances de collaboration (voir section 5.6).

Nos observations montrent que les dessins principalement utilisés sont construits avec des outils de CAO. A nouveau, nous devons souligner qu'il ne s'agit que de documents amenés dans l'espace de travail interactif. Cela ne représente pas nécessairement les modes de travail individuel entrecoupant les séances de travail collectif (même si on peut penser, qu'à des fins d'efficacité et d'économie, les étudiants n'ont probablement pas multiplié les outils et représentations hors séances de conception collaborative). Les taux de liaison montrent une répulsion pour les dessins CAO en tout début de processus, suggérant que d'autres modes de représentations sont préférés pour démarrer la conception. Ceci est cohérent avec les nombreuses recherches comparant l'esquisse aux dessins CAO : les instruments numériques, par les contraintes qu'ils imposent au concepteur, ne sont pas adaptés aux étapes précoces de la conception (Goldschmidt, 1991 ; Goel, 1995 ; McCall *et al.*, 2001)). Nos observations montrent aussi une attraction pour les dessins CAO aux réunions SDC4 et SDC8. Or, ces deux séances sont précisément celles qui précèdent les deux présentations publiques. Ceci nous incite à penser que les dessins de CAO sont avant tout des supports privilégiés de présentation de contenus structurés.

Les images, non produites par le groupe, constituent une part importante des représentations utilisées par les concepteurs. Leur nombre élevé (173 en tout) est vraisemblablement dû au faible coût de production de ces représentations : il s'agit pour l'essentiel d'images téléchargées d'Internet, servant de références (157/173, soit 91%) et, pour le restant, de photographies des sites d'implantation (aériennes ou non) ou d'informations techniques, en quantités égales. Très clairement, l'analyse des taux de liaison montre une répulsion pour ce type de représentations aux séances précédant les présentations formelles et une attraction au démarrage du projet (SDC2) et à la suite de la présentation intermédiaire (SDC5). Cette réunion peut, à certains égards, être considérée comme un second démarrage du projet : la critique, voire la remise en question de certains éléments du produit de la conception par les enseignants, pousse les participants à devoir trouver d'autres pistes d'inspiration. En observant les chiffres de plus près, nous constatons d'ailleurs que c'est essentiellement l'utilisation des images qui explique les tendances globales observées sur l'évolution du nombre total de représentations utilisées.

Enfin, concernant les autres types de représentations, nous notons les observations suivantes.

- La maquette est utilisée de manière anecdotique. Ceci est aisément compréhensible dans la mesure où les moyens qui sont utilisés pour la partager (en l'occurrence, le partage à distance des maquettes se fait via des photos de celles-ci), leur font perdre tout le bénéfice de ce type de représentation, à savoir, principalement, leur tangibilité.
- Les plans importés, consistant en des plans cadastraux des sites, ne sont, sans surprise, utilisés qu'au début du processus. Très rapidement, les informations contenues dans ce type de plans (agencement de la parcelle et environnement immédiat) sont reproduites directement dans les autres types de représentations. Ces plans perdent donc rapidement leur utilité.
- Les schémas, représentations abstraites du bâtiment ou de certains de ses attributs (notamment l'adjacence des locaux, qui est fréquemment représentée de la sorte par les étudiants) ne sont, eux aussi, utilisés qu'en début de processus. Ces informations représentées sous forme abstraite prennent plus tard des formes concrètes, à même les plans.
- Il y a peu de textes et tableaux dans l'espace de conception. Cependant, de nombreux textes et légendes accompagnent les images, plans et modèles.

Enfin, il faut noter que, quel que soit l'outil utilisé, on peut globalement observer un mouvement croissant vers la précision et la complétude des représentations. C'est ainsi que les dessins sur logiciels de CAO observés en début de processus ne diffèrent sensiblement pas, en précision et en quantité d'informations, des esquisses papier-crayon existant au même moment.

Nos observations confirment les tendances générales décrites dans la littérature, notamment par Lebahar (1983) et McGown *et al.* (1998), qui constatent que les représentations utilisées en architecture tendent vers plus de précision et de complexité. Ils montrent aussi que cette évolution est progressive et qu'elle dépend de l'avancement du processus.

5.3.2. Différences entre les groupes

Nous cherchons à savoir s'il existe des « profils » d'utilisation des représentations pour la collaboration à distance, en regard des « profils » de collaboration identifiés dans les sections précédentes. Dans cette section, nous procédons donc à une analyse comparative entre les groupes. Le tableau 17 montre la répartition des types de dessins entre les groupes.

	GR1	GR2	GR3	Total
Modèles 3D	17	17	61	95
Plans CAO	142	37	72	251
Croquis P/C	39	4	49	92
Croquis SketSha	12	31	29	72
Images	90	14	69	173
Maquettes (Photo)	4	0	1	5
Plans scannés	4	4	1	9
Schémas	9	2	6	17
Texte	7	0	6	13
Total	324	109	294	727

Tableau 17

Répartition des différentes représentations en fonction du groupe et taux de liaison (attraction en bleu vs. répulsion en orange, au seuil de 0,5) entre les modalités de la variable « type de représentation » et de la variable « groupe ».

Tout d'abord, nous observons très clairement une nette différence entre, d'une part, le groupe 2 et, d'autre part, les groupes 1 et 3. Le premier utilise nettement moins de représentations différentes (109 en tout), environ trois fois moins que les deux autres groupes (respectivement 324 et 294). Outre le nombre, le type de représentations utilisées varie aussi en fonction du groupe (Khi2 (16) = 127,13, $p < 0,001$). Le lien entre les deux variables est d'intensité moyenne ($V^2 = 0,09$).

L'analyse des taux de liaison révèle trois profils de collaboration.

- Le groupe 1 a une attraction vers les dessins CAO et les maquettes en carton, et une répulsion en direction des croquis SketSha et des modèles 3D. Leur mode de collaboration, centré sur la conception distribuée, est supporté principalement par l'échange et le commentaire de fichiers

CAO construits préalablement à la réunion. Il n'y a pas beaucoup de génération d'idées collectives, expliquant la répulsion pour les croquis numériques. Le groupe préfère annoter ses documents pré-établis. En outre, pour ce groupe, la maquette en carton semble remplacer en partie, l'usage des modèles 3D.

- Le groupe 2 a une nette attraction vers les croquis SketSha et une répulsion en direction des croquis papier-crayon et des images. Comme nous l'avons déjà décrit précédemment, ce groupe collabore sur un mode de co-conception. Ils échangent beaucoup moins de documents pré-établis et dessinent ensemble pendant les séances de collaboration. Les activités de simulation propres aux environnements papier-crayon sont ici effectuées collectivement, par l'intermédiaire des esquisses numériques, ce qui explique nos observations relatives aux taux de liaison. En outre, le groupe s'accorde directement sur un concept, dans les premières réunions. Il n'y a donc pas une seconde étape d'idéation suivant la présentation intermédiaire, telle qu'observée dans les autres groupes. Ceci explique le nombre moins important d'images utilisées.
- Le groupe 3 a une nette attraction pour les modèles 3D et pour les croquis papier-crayon, et une répulsion en direction des dessins CAO. Cela est sans doute imputable à leur difficulté de s'accorder sur un concept commun. Le groupe utilise peu de représentations « techniques » du bâtiment, leur préférant des représentations purement visuelles, notamment en vue de convaincre les différents membres.

Ces observations permettent assez clairement d'identifier des usages différents des représentations externes lors de séances de collaboration. Manifestement, chaque collectif a une façon particulière d'utiliser ses documents pour collaborer. Outre ces observations générales, il est intéressant de voir les évolutions dans les usages des représentations en fonction du temps et ce, au sein de chacun des groupes. Les analyses des taux de liaison pour chacun des groupes sont détaillées dans les tableaux 18, 19 et 20.

5.3.3. Groupe 1

Les représentations utilisées à chaque étape par le groupe 1 sont détaillées dans le tableau 18.

Groupe 1 : V2 = 0,13										
	SDC2	SDC3	SDC4		SDC5	SDC6	SDC7	SDC8		Total
Modèles 3D	0	3	0	Présentation intermédiaire	0	8	6	0	Présentation finale	17
Plans CAO	0	22	43		15	18	19	25		142
Croquis P/C	7	16	14		2	0	0	0		39
Croquis SketSha	0	2	2		6	1	0	1		12
Images	27	11	4		25	4	16	3		90
Maquettes (Photo)	0	0	0		4	0	0	0		4
Plans scannés	4	0	0		0	0	0	0		4
Schémas	1	8	0		0	0	0	0		9
Texte	2	1	1		1	1	1	0		7
Total	41	63	64		53	32	42	29	324	

Tableau 18

Répartition des représentations en fonction du temps (chiffres) et taux de liaison (attraction en bleu vs. répulsion et en orange, au seuil de 0,5) entre les modalités de la variable « type de représentation » et de la variable « séance de travail » pour le groupe 1.

Le groupe 1 confirme toutes les tendances que nous avons observées sur l'ensemble des groupes : préférence pour le papier-crayon en début et pour la 3D en fin de processus, utilisation préférentielle des plans CAO aux étapes de présentation et utilisation préférentielle des images dans les deux « démarrages » du projet. Les croquis numériques sont principalement utilisés en SDC5, après la présentation intermédiaire, probablement pour s'accorder sur les modifications à mettre en place après le *feedback* des enseignants.

Le lien entre les variables « séance de travail » et « type de représentation » est intermédiaire ($V2 = 0,13$), ce qui signifie que le groupe adapte les documents qu'il utilise selon la séance.

5.3.4. Groupe 2

Le tableau 19 détaille les différentes représentations utilisées par le groupe 2 à chacune des séances.

Groupe 2 : $V2 = 0,21$										
	SDC2	SDC3	SDC4		SDC5	SDC6	SDC7	SDC8		Total
Modèles 3D	3	0	0	Présentation intermédiaire	0	9	0	5	Présentation finale	17
Plans CAO	2	0	8		5	9	6	7		37
Croquis P/C	3	1	0		0	0	0	0		4
Croquis SketSha	1	9	2		1	2	11	5		31
Images	14	0	0		0	0	0	0		14
Maquettes (Photo)	0	0	0		0	0	0	0		0
Plans scannés	3	1	0		0	0	0	0		4
Schémas	0	2	0		0	0	0	0		2
Texte	0	0	0		0	0	0	0		0
Total	26	13	10			6	20	17		17

Tableau 19

Taux de liaison (attraction en bleu vs. répulsion en orange, au seuil de 0,5) entre les modalités de la variable « type de représentation » et de la variable « séance de travail » pour le groupe 2.

Ici aussi, les tendances relatives à la 3D et au croquis sont observées. Par contre, on ne rencontre pas les mêmes autres tendances que pour le premier groupe : les images ne sont utilisées qu'en début de processus, ce qui peut signifier que les décisions de principe et les grands concepts, ont été très vite agréés par tous et qu'il n'y a pas eu de remise en question suite à la présentation intermédiaire. Les dessins CAO interviennent principalement avant et après la présentation intermédiaire (en proportion). En valeur absolue, le nombre de ces représentations ne varie pas énormément. De la même manière que dans les autres groupes, ces documents CAO sont peu utilisés en début de processus. Par contre, contrairement aux autres groupes, le croquis SketSha occupe une place importante dans les représentations utilisées, soit 28% de la production du groupe.

Enfin, le $V2$ de Cramer (0,21) montre une association forte entre les variables (contre des associations d'intensité intermédiaire pour les deux autres groupes, à savoir $V2 = 0,13$ pour GR1 et 0,12 pour GR2). Ceci montre que ce groupe, en particulier, adapte fortement le type de

représentations qu'il utilise aux différentes étapes de la conception. Cette adaptation est sans doute une des clés du succès du groupe. En effet, le groupe 2, aussi bien par les enseignants que par nos analyses, a été jugé comme le meilleur au point de vue de la qualité de la collaboration qu'il mobilise. A noter aussi que le groupe n'utilise ni maquette, ni texte.

5.3.5. Groupe 3

Le tableau 20 détaille l'utilisation des différents types de représentations par le troisième groupe.

Groupe 3 : $V2 = 0,12$										
	SDC2	SDC3	SDC4		SDC5	SDC6	SDC7	SDC8		Total
Modèles 3D	0	0	12	Présentation intermédiaire	10	9	11	19	Présentation finale	61
Plans CAO	1	5	10		21	9	11	15		72
Croquis P/C	23	19	3		0	4	0	0		49
Croquis SketSha	4	7	2		4	7	2	3		29
Images	16	3	3		22	23	2	0		69
Maquettes (Photo)	0	1	0		0	0	0	0		1
Plans scannés	0	1	0		0	0	0	0		1
Schémas	2	0	0		4	0	0	0		6
Texte	1	0	0		1	0	0	4		6
Total	47	36	30			62	52	26		41

Tableau 20

Taux de liaison (attraction en bleu vs. répulsion en orange, au seuil de 0,5) entre les modalités de la variable « type de représentation » et de la variable « séance de travail » pour le groupe 3.

Pour le groupe 3, on retrouve de nouveau cette tendance globale à l'abandon du papier-crayon pour les modeleurs 3D, ces deux modes d'expression étant les médias privilégiés par le groupe. Les modèles 3D interviennent ici, relativement tôt dans la conception (en SDC4). On retrouve aussi la tendance à utiliser les images au démarrage, mais surtout après la présentation intermédiaire. Ces images sont encore largement utilisées en SDC6. Ceci est probablement dû au fait qu'un conflit dans le groupe prolonge la négociation sur les concepts plus loin, jusqu'à l'intervention du corps enseignant entre SDC6 et SDC7. Enfin, les croquis CAO sont principalement utilisés dans les dernières étapes de la conception, avec une répulsion dans la première réunion. Le lien entre les variables est d'intensité moyenne ($V2 = 0,12$). Comme évoqué précédemment, le groupe utilise préférentiellement des représentations portant sur les aspects visuels et esthétiques du bâtiment, figurés par des modèles 3D et des croquis.

5.4. Utilisation des annotations numériques

Nous considérons ici l'usage de la modalité graphique de communication en complément à l'utilisation de documents pré-établis. Pour ce faire, nous avons classifié les annotations numériques (c'est-à-dire les traces graphiques effectuées à l'aide du stylo numérique en surimpression aux documents importés dans l'espace de travail collaboratif) en quatre catégories,

suivant qu'elles apportent des informations nouvelles ou non, et suivant le degré de correspondance spatiale entre l'annotation et le dessin sous-jacent : « géométrie », « informations », « pointage », « surlignage » (voir point 4.3 du présent chapitre). La figure 88 montre les proportions de ces différents types d'annotations.

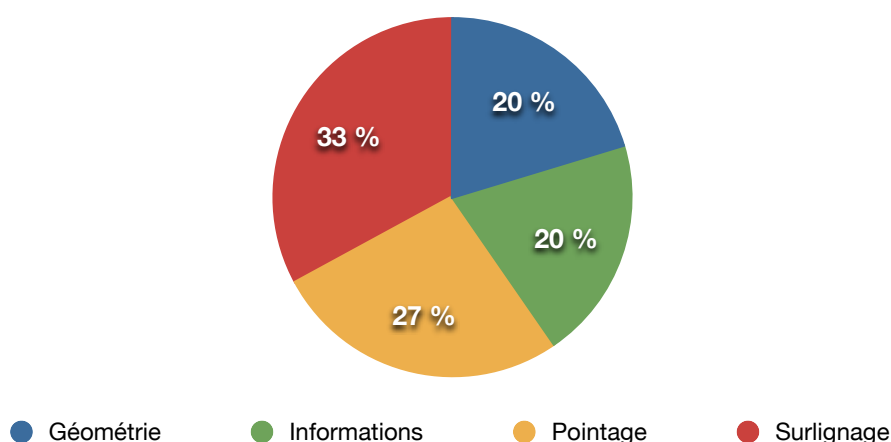


Figure 88
Proportions des types d'annotations numériques utilisées.

D'un point de vue global, les groupes utilisent majoritairement des annotations n'apportant pas d'information supplémentaire à la représentation qu'elles accompagnent (surlignage suivi de pointage). Néanmoins, les annotations de type « géométrie » et « informations », qui complètent les informations de la représentation sous-jacente, comptent tout de même chacune pour 20 % des annotations.

Les annotations et dessins sur SketSha sont effectués de manière différente dans les trois groupes. S'il n'y a pas de nette différence entre les groupes sur la proportion de dessins qui sont annotés (56% des dessins du groupe 2 et 58% de ceux des groupes 1 et 3, comprennent des annotations), la répartition des types d'annotations diffère entre les trois groupes. Le tableau 21 montre la répartition des différents types d'annotations pour chacun des groupes (avec une association entre les variables d'intensité intermédiaire, $V_2 = 0,05$).

	Géométrie	Informations	Pointage	Surlignage
GR1	0,17	0,17	0,22	0,43
GR2	0,42	0,24	0,13	0,21
GR3	0,18	0,23	0,37	0,22
Total	0,20	0,20	0,27	0,33

Tableau 21
Répartition des types d'annotations suivant les groupes. L'analyse des taux de liaison (au seuil de 0,25) est montrée par les codes couleurs : orange pour les répulsions et bleu pour les attractions. La dernière ligne montre les proportions de chacun des types d'annotations, tous groupes confondus.

De ces observations, il apparaît assez clairement que le groupe 2 tire profit de la modalité graphique pour ajouter des informations aux dessins annotés (par l'utilisation massive des annotations de types « géométrie » et « informations »). Cela est cohérent avec l'optique de travail dans laquelle ses membres sont engagés. Ils élaborent en effet les solutions collectivement et de manière synchrone. L'esquisse numérique semble être un média privilégié de cette co-

construction. Les faibles proportions d'annotations de pointage et de surlignage dans ce groupe montrent qu'il est essentiellement tourné vers la construction de contenus inédits.

Le groupe 3, en revanche, utilise essentiellement les annotations pour mettre en évidence des éléments du dessin pré-existant. Cela est cohérent avec les observations faites en situation : l'essentiel du travail consiste à élaborer les solutions de manière individuelle, puis à les présenter au groupe lors des séances de collaboration. Les annotations de pointage permettent probablement de soutenir la présentation du discours.

Le groupe 1, quant à lui, utilise essentiellement les annotations de surlignage. Il est difficile de statuer sur le cas particulier de ce type d'annotations, qui remplit probablement d'autres rôles que celui de la simple mise en évidence d'éléments pour la discussion. Néanmoins, il est possible que ces annotations permettent de prendre des décisions collectives et de coordonner les actions.

Les types d'annotations varient aussi en fonction des catégories de documents qu'elles accompagnent (avec un lien d'intensité intermédiaire, $V2 = 0,10$). Le tableau 22 montre la relation entre ces deux variables.

	Géométrie	Informations	Pointage	Surlignage	% annoté
Modèles 3D	0	9	9	19	0,33
Plans CAO	49	46	40	70	0,63
Croquis P/C	20	13	21	18	0,7
Images	0	1	36	3	0,23
Maquettes (Photo)	0	0	0	0	0
Plans scannés	1	2	1	0	0,44
Schémas	1	1	5	6	0,71
Texte	0	0	2	0	0,15

Tableau 22

Répartition des types d'annotations suivant les catégories de documents. L'analyse des taux de liaison (au seuil de 0,25) est montrée par les codes couleurs : orange pour les répulsion et bleu pour les attractions. A des fins de lisibilité, les taux de liaison n'ont pas été indiqués pour les quatre derniers types de représentations, compte tenu de leurs occurrences plutôt anecdotiques. La colonne de droite identifie les proportions de documents annotés pour chacune des catégories.

Le tableau montre plusieurs constatations intéressantes.

- Les plans CAO et les croquis papier-crayon sont les plus annotés, en proportion (plus de 60% de ces types de documents sont annotés durant les réunions). Ils constituent donc des supports privilégiés pour le travail collaboratif. En outre, tous les types d'annotations sont présents sur ces représentations. Cela est sans doute aussi un indice de leur polyvalence.
- Les annotations numériques sur les images sont quasi exclusivement de type « pointage ». Ces images sont donc utilisées principalement pour illustrer un propos, plus que comme base réelle à la conception. De nouvelles informations, complémentaires à celles de l'image, ne sont que très rarement amenées. En outre, moins d'un quart des images sont accompagnées d'annotations.
- Les modèles 3D sont principalement accompagnés d'annotations de type « surlignage », et jamais de nouveaux dessins. Ceci peut être dû au fait qu'il est difficile de modifier les modèles

car le dessin en trois dimensions pose des difficultés aux étudiants, que les modèles 3D sont jugés trop finis pour servir de support à de la conception à proprement parler, ou encore que l'esquisse numérique n'est pas un moyen approprié d'annotation de modèles 3D (différentes recherches existent à ce sujet, proposant des outils dédiés tels que des « post-its » numériques). Il est néanmoins nécessaire d'investiguer plus en profondeur le rôle des annotations redondantes sur ces modèles.

Les annotations évoluent aussi au cours du temps ($V2 = 0,07$), comme le montre le tableau 23.

	SDC2	SDC3	SDC4		SDC5	SDC6	SDC7	SDC8	
Géométrie	0	18	20	P.F1	11	7	11	4	P.F2
Informations	9	2	14		10	11	11	16	
Pointage	30	17	8		19	18	12	10	
Surlignage	5	32	23		7	16	15	19	
Proportion	0,36	0,67	0,6		0,35	0,4	0,53	0,46	

Tableau 23

Répartition des types d'annotations suivant les dessins. L'analyse des taux de liaison (au seuil de 0,25) est montrée par les codes couleurs : orange pour les répulsion et bleu pour les attractions. La colonne de droite identifie les proportions de documents annotés pour chacune des réunions.

Les annotations de type « géométrie » sont essentiellement effectuées durant les premières étapes et tendent à disparaître en fin de conception. Ceci est aisément compréhensible car les documents, au terme du processus de conception, sont plus aboutis, et les décisions majeures sont déjà prises. Il est donc sans doute moins nécessaire d'effectuer des modifications profondes aux représentations amenées dans l'espace de travail, ou de les remettre en question. En fin de conception, les annotations de type « informations » tendent d'ailleurs à suppléer celles de type « géométrie ». Ainsi, l'ajout d'informations s'effectue à ce moment de manière plus ponctuelle.

Les annotations de pointage sont principalement utilisées durant la première réunion et celle suivant la présentation intermédiaire. Ce constat s'explique par le fait que ce type d'annotations accompagne principalement les images qui, elles-mêmes, sont utilisées lors de ces deux réunions (voir point 5.3).

Les annotations de surlignage sont utilisées pendant tout le processus, à l'exception des réunions durant lesquelles de nombreuses annotations de pointage sont observées.

Enfin, il nous faut noter que les annotations textuelles à l'aide du stylo numérique sont extrêmement rares : nous n'en avons comptabilisé qu'une seule sur l'ensemble des productions graphiques des étudiants. Deux hypothèses nous permettent de comprendre cette observation.

- Le texte n'est sans doute pas le moyen privilégié de communication pour les architectes. Les éléments verbaux sont principalement portés par le discours oral, complété d'une trace graphique pour les éléments d'ordre géométrique, figuratif ou déictique (pointage).
- Le stylo numérique, et les possibilités graphiques qu'il offre (taille des traits, principalement), n'est peut-être pas approprié pour soutenir l'annotation textuelle numérique.

Cette observation peut probablement être expliquée par une balance entre ces deux hypothèses : la difficulté d'écrire avec le stylo électronique pour soutenir une activité qui n'est pas strictement nécessaire diminue l'occurrence de ce comportement.

5.4.1. Propriétés graphiques des annotations

Il est à noter que les différentes annotations observées ici sont assez pauvres graphiquement. Les croquis et annotations, dans les trois groupes observés, contiennent une faible quantité de traits, avec très peu de variété et de précision. En outre, les annotations sont rarement expressives : elles sont réduites au strict minimum nécessaire pour véhiculer les idées. Elles sont non conventionnelles : le contenu de la plupart d'entre elles est largement incompréhensible sans une observation de l'activité, même par un professionnel du domaine.



Figure 89

Croquis SketSha (gauche) et annotation collective (droite). Ces images sont représentatives du type de production graphique observée dans l'atelier. Elles illustrent le caractère sommaire de l'expressivité des croquis.

Cette propriété des esquisses n'est pas entièrement due aux caractéristiques du système. D'une part, les utilisations individuelles de l'environnement de croquis numériques, détaillées dans les études précédentes de ce travail, ont montré une richesse potentielle bien plus importante des croquis. D'autre part, l'utilisation du Studio Digital Collaboratif dans d'autres contextes a parfois permis l'émergence de dessins très élaborés. La figure suivante montre un dessin effectué de manière collaborative par deux architectes professionnels situés sur des postes distants, dans le cadre d'une situation expérimentale. Ce dessin, outre le fait d'avoir été dessiné de manière concomitante par deux architectes situés à distance, possède des caractéristiques graphiques bien éloignées des annotations observées dans l'atelier. Le croquis est ici relativement expressif, il comprend de nombreux traits de qualités différentes et est compréhensible en l'état.

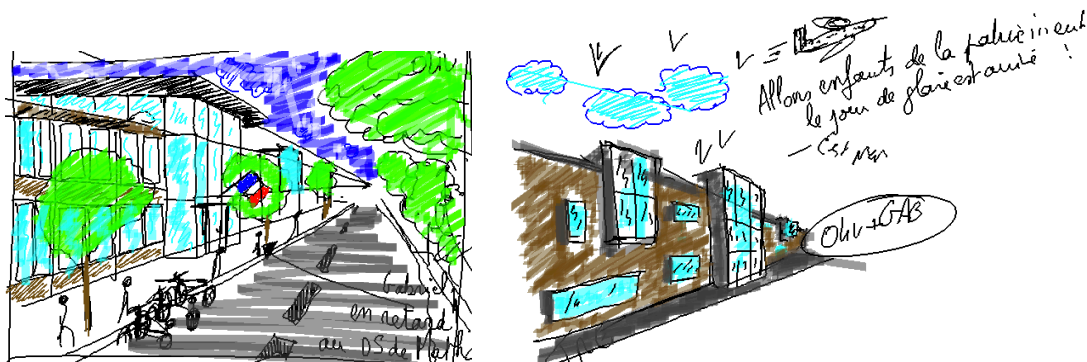


Figure 90

Croquis d'une façade vitrée dans le cadre d'un exercice de conception sur SketSha⁷⁵.

⁷⁵ Cette image est tirée des situations expérimentales ayant été menées dans le cadre du projet ANR CoCréa. Pratiques collaboratives en conception architecturale - Réf ANR 08 CREA-030-02.

Un autre élément à constater, et déjà évoqué précédemment, est l'absence quasi totale d'annotations textuelles. Or, Détienne *et al.* (2006) ont montré que, pour des réunions de revue de projet en papier-crayon (dans un contexte professionnel), les annotations textuelles constituent le principal mode d'interaction graphique.

A nouveau, nous pouvons interpréter ces deux observations par un principe d'économie. En effet, les étudiants tendent à minimiser les actions graphiquement élaborées, en l'occurrence les dessins expressifs et l'écriture, au profit de l'utilisation de la modalité graphique pour annoter un maximum de dessins. Ils privilégient en quelque sorte la quantité à la qualité. Ce constat s'explique par différentes raisons : les limites des possibilités d'expression graphique avec SketSha (peu de variété dans les outils, traits aux caractéristiques uniformes), la difficulté spécifiquement liée à l'écriture (compte tenu de la taille des traits, il est nécessaire d'écrire avec des caractères de grande taille) et les limites de temps lors des réunions sur le SDC. Ces limitations sont compensées par l'échange asynchrone d'éléments textuels et de documents graphiquement élaborés, principalement par mail, avant et après les réunions.

5.5. Synthèse de l'utilisation des documents

Cette première approche, statique, nous permet d'identifier trois usages différents des documents virtuels et de l'esquisse numérique par les trois groupes.

Le premier groupe utilise beaucoup de représentations, essentiellement des représentations « techniques » que sont les plans CAO. En ce qui concerne les annotations numériques, le groupe effectue principalement du surlignage. Cet usage correspond aux pratiques décrites par les étudiants et observées lors des séances de collaboration. Ce groupe travaille en effet, essentiellement de manière décentralisée et strictement organisée. Tous les documents sont échangés préalablement à la réunion sur le SDC, et sont donc connus des participants. L'utilisation massive du surlignage vise sans doute à mettre en évidence les éléments problématiques des différents dessins, en vue de prendre en commun les décisions permettant de continuer le travail individuel. Le partage des représentations de type CAO permet de mettre tous les membres du groupe sur un pied d'égalité. En effet, les liégeois maîtrisent moins bien les logiciels de modélisation 3D que les nancéiens et disposent de moins de temps dans l'atelier pour concevoir des modèles 3D.

Les membres du deuxième groupe font preuve d'un usage totalement différent des représentations qu'ils manipulent. Ils utilisent trois fois moins de documents que les autres groupes et utilisent massivement l'esquisse numérique, que ce soit en annotant des documents en y ajoutant de l'information (annotations de types informations et géométrie), ou en traçant des croquis indépendants des documents. Ce groupe est caractérisé par une bonne qualité de la collaboration et fonctionne sur un mode de co-conception. L'esquisse numérique est pour eux un vecteur d'expression et de décisions communes. En outre, ce groupe est celui qui fait preuve de la plus grande flexibilité dans l'usage des différents types de documents : les statistiques montrent un lien très important entre le type de documents et la séance de travail, c'est-à-dire l'avancement du processus.

Le troisième groupe est, quant à lui, caractérisé par l'utilisation d'un nombre important de représentations différentes. Celles-ci sont principalement des représentations des niveaux conceptuels et esthétiques du projet. Les représentations techniques peu nombreuses expliquent probablement en partie les failles du projet identifiées par les enseignants lors de l'évaluation. Les annotations sont principalement de type pointage, et expriment une volonté de communiquer des décisions pré-établies, plutôt que de concevoir ou décider ensemble. L'approche argumentaire vise

à convaincre les uns et les autres de la justesse des décisions prises en dehors des séances synchrones. Comme nous l'avons souligné précédemment, ce mode de fonctionnement est générateur de frustrations et de conflits au sein du groupe.

Cette approche nous permet également de comprendre l'utilité des différentes représentations échangées dans les sessions de collaboration. Les divers documents semblent remplir des fonctions spécifiques. Ils interviennent à différents moments du processus et ce, de manière assez nette.

- Les images fournissent essentiellement des références pour la conception. Elles sont utilisées majoritairement au début du processus et après le premier *feedback* des enseignants, dans le but de fournir des sources d'inspiration et de négociation autour du concept. Elles ne sont accompagnées que par très peu d'annotations et celles-ci sont presque exclusivement de l'ordre du pointage. Les images ne servent donc pas de base directe à l'expression graphique.
- Les modèles 3D sont utilisés intensivement. A noter que les étudiants nancéiens sont obligés de produire ce type de représentations dans le cadre de l'atelier, ce qui crée sans doute une sur-représentation de ces documents. Cependant, malgré ce constat, des tendances ressortent de nos observations. Les modèles 3D sont majoritairement utilisés à des fins de rendu et de démonstration. Ils sont utilisés principalement en fin de processus, dans les dernières réunions avant le rendu final. Ils sont rarement accompagnés d'annotations et celles-ci sont des surlignages permettant de mettre en avant certains des éléments présents sur ces modèles.
- Les croquis papier-crayon servent exclusivement à un travail d'idéation. Ils sont très vite abandonnés au profit de représentations plus complexes et/ou complètes, telles que les modèles 3D ou les plans CAO. Les croquis sont très souvent accompagnés d'annotations de tous types, montrant leur polyvalence.
- Les plans CAO sont les supports principaux de l'activité de conception. Ils s'avèrent utiles à des fins de présentation et de finalisation, étant majoritairement utilisés avant les présentations formelles. Mais ils sont plus que cela. Dès la troisième semaine, ils deviennent des supports privilégiés de la conception et sont massivement accompagnés de tous types d'annotations, démontrant leur utilité en tant que support au processus argumentatif et à l'activité de conception.
- Sans surprise, les plans scannés, les schémas conceptuels (graphes d'adjacence), les textes et les images de maquettes sont peu utilisés dans le cadre de la conception collaborative. Les plans et schémas n'ont plus d'utilité au-delà des premières semaines et les maquettes, quant à elles, ne sont sans doute pas exploitées pour des raisons techniques, une maquette tangible ne pouvant être partagée à distance.

Il nous semble important de préciser que nos observations sur l'utilisation des modèles 3D et des croquis papier-crayon, ne rejoignent pas celles d'Elsen dans le domaine du design industriel (Elsen & Dawans, 2010). Alors que cette dernière constate une coexistence de ces deux types d'outils chez les designers dans les phases précoces de la conception, les étudiants architectes observés utilisent comme instruments de collaboration et de communication d'abord les croquis, puis les modèles 3D dans un second temps. Nos résultats confirment aussi les tendances observées dans la littérature concernant l'utilisation préférentielle du dessin à main levée dans les phases précoces de la conception : l'esquisse papier-crayon est le média d'expression privilégié dans les deux premières réunions, puis disparaît de l'environnement de collaboration au profit des dessins CAO.

Enfin l'esquisse numérique est quant à elle utilisée de manière beaucoup plus polyvalente que le papier-crayon. Si les croquis SketSha et les annotations de type « géométrie » sont utilisés principalement au début du processus, ils perdurent néanmoins tout au long de l'atelier. L'esquisse numérique est un instrument privilégié à la fois de la communication et de la conception. Nos premiers résultats tendent à montrer que les annotations de type géométrie sont principalement des supports à la co-conception, que les annotations de pointage servent la communication et l'argumentation, et que les annotations de type surlignage servent à la prise de décision.

Cependant, cette analyse statique et essentiellement quantitative des comportements d'annotation nous apparaît éclairante mais insuffisante pour comprendre en profondeur les usages cognitifs du dessin numérique et pour proposer des pistes de développement pour les interfaces-esquisses. Pour compléter notre étude, nous approfondissons les rôles et fonctions des annotations numériques au travers d'une analyse de l'activité, détaillée dans la section suivante.

5.6. Analyse dynamique de l'usage des annotations

En complément à l'analyse « statique » de l'usage des documents et de l'esquisse numérique, nous effectuons une analyse « dynamique » des comportements d'annotation. En nous basant sur un échantillonnage des différentes activités d'annotation dans les trois groupes, nous identifions six fonctions aux annotations et des différences dans les usages selon les groupes et les individus.

5.6.1. Fonctions des annotations

Les annotations numériques remplissent plusieurs fonctions au cours de l'activité collective.

- **Attirer l'attention sur un élément du dessin.** Il s'agit de soutenir la communication en contextualisant spatialement le discours, à même le dessin. C'est le rôle déictique des annotations. Ce rôle est porté par les annotations de type « pointage » mais aussi par certaines annotations de type « surlignage ». Cette fonction de l'annotation est temporaire : une fois le pointage effectué, la trace n'est plus nécessaire. Ces annotations sont comparables à d'autres opérations de désignation effectuées avec des gestes de pointage (principalement lorsque la cible du discours est située localement) ou à l'aide de la pointe du stylo (en faisant bouger le pointeur sur l'espace de travail sans tracer de trait, le pointeur étant affiché sur l'espace distant). Ces annotations déictiques sont généralement utilisées quand le locuteur n'est pas le « propriétaire » des documents (voir plus loin, section 5.7).

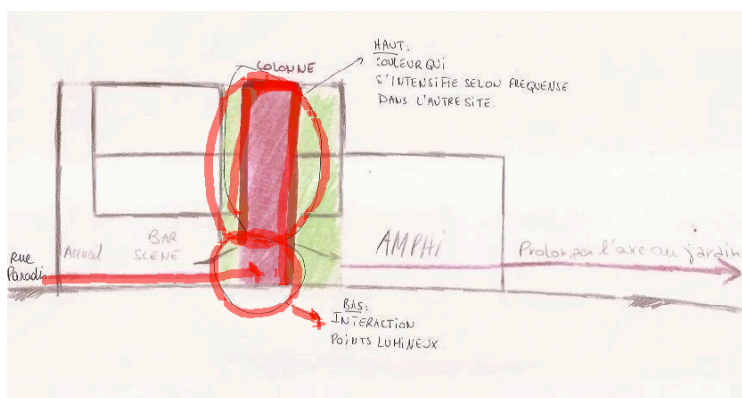


Figure 91

Annotation sur croquis visant à soutenir le discours en identifiant graphiquement les éléments sur lesquels celui-ci porte.

- Une deuxième fonction, proche de la précédente mais toutefois différente, consiste à **mettre en correspondance des éléments présents sur plusieurs représentations**. Ainsi, il ne s'agit pas uniquement de supporter le discours, mais aussi de permettre de faire des liens entre plusieurs représentations, sur un mode graphique. Dans l'illustration ci-après (figure 92), le concepteur, tout en expliquant à ses partenaires les principes sous-jacents de son bâtiment, montre explicitement sur les cinq dessins où se situe le « cœur du projet ». Cette fonction est supportée par des surlignages, ou par des annotations de pointage. Aucune information nouvelle n'est

spécifiquement ajoutée au sein des représentations, mais cette mise en correspondance permet de véhiculer un message spécifique, à savoir l'identification sur plusieurs dessins d'un concept commun.

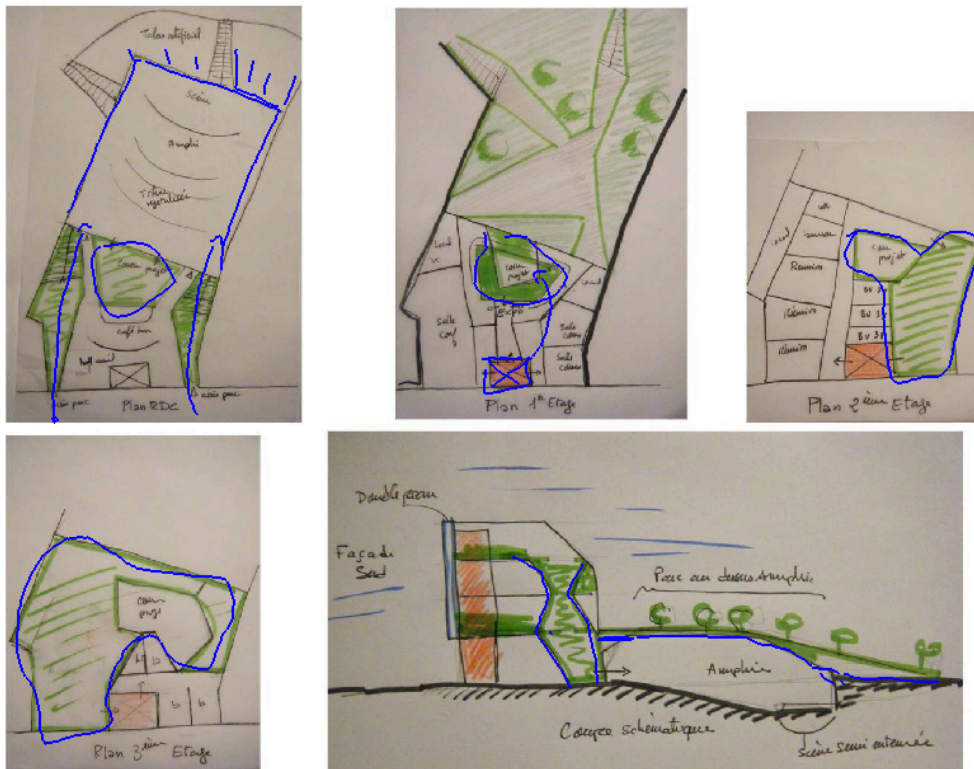


Figure 92

Identification du « cœur du projet » à l'aide d'annotations (en bleu) sur les différents plans des étages du bâtiment et sur une coupe.

- Les concepteurs utilisent aussi des annotations visant à **contextualiser le dessin** sur lequel elles s'inscrivent. Il s'agit typiquement d'indiquer le nord ou les éléments de contexte avoisinant (route, bâtiment de voisinage, etc.). Cette contextualisation est importante dans le cours de la communication, mais ne crée pas d'information inédite devant être pérennisée. Elle est portée par des annotations de type « informations ». Ces annotations visent explicitement à réduire les ambiguïtés quant à la synchronisation des points de vue.

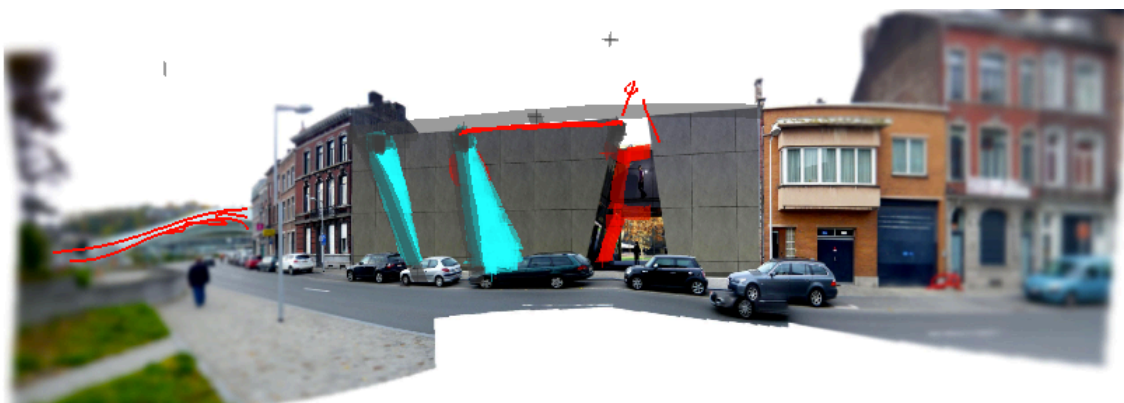


Figure 93

Ajout d'éléments de contexte sur une image de façade du bâtiment : la forme particulière de la gare toute proche est repassée au stylo rouge et les vitres de la façade sont soulignées à l'aide de la couleur turquoise.

- Une autre fonction consiste à **compléter le dessin** par des informations non présentes explicitement, telles que les circulations ou le comportement de la lumière. Il s'agit ici d'informations sur le fonctionnement, l'utilisation ou l'ambiance dans le bâtiment. Ce sont des éléments que la représentation architecturale traditionnelle ne contient pas, les plans adoptant un point de vue strictement géométrique sur l'objet. Ces informations expliquent comment interpréter le plan. Le croquis numérique, accompagné du discours, permet de suppléer à certaines faiblesses des autres représentations. Ces compléments d'informations sont principalement portés par des annotations de type « informations », à même le dessin. Le complément du dessin pourra aussi être porté par l'adoption d'un autre point de vue sur l'objet, comme par exemple un dessin de détail, un plan d'ensemble ou une coupe synthétique, via un croquis numérique second (ou *satellite drawings*, c'est-à-dire un dessin tracé à côté d'un autre et visant à compléter le premier, voir Leclercq, 2005 ou McCall *et al.*, 2001).

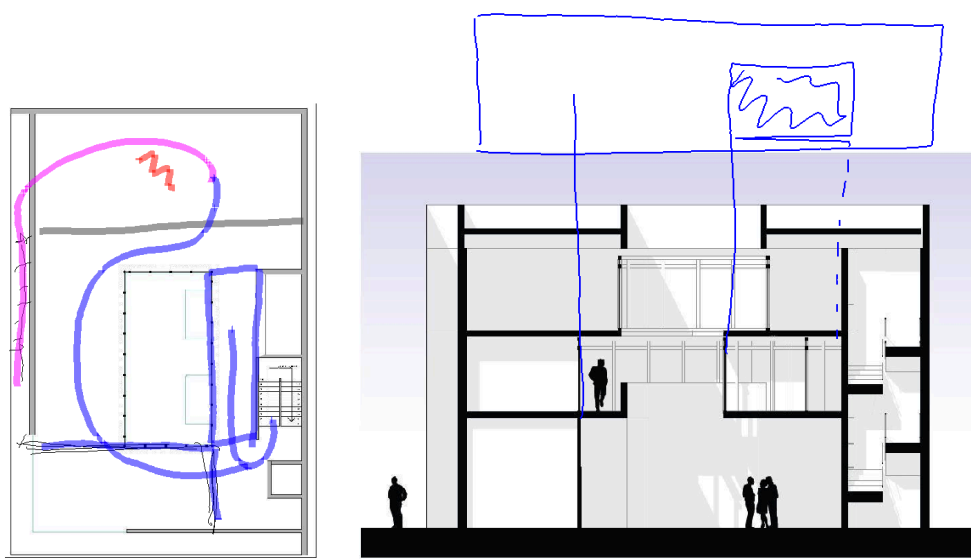


Figure 94

Ajouts d'informations sur une représentation. A gauche : identification du sens de visite de l'étage. A droite, plan mis en regard d'une coupe.

- Les esquisses numériques sont également utilisées pour « **synthétiser** » le dessin. Il s'agit pour le concepteur de surligner certaines parties du dessin pour mettre en évidence les éléments principaux du bâtiment. Ainsi, le dessin est synthétisé en « zones fonctionnelles » qui suppléent aux locaux du bâtiment. Cette fonction est remplie par des annotations de surlignage et aucune information nouvelle n'est amenée au dessin. Cette synthèse est proche de la mise au net dans l'activité individuelle, mais elle n'est pas fonctionnellement identique. En effet, elle permet de réduire la complexité du dessin et en partie l'incertitude, mais elle n'ajoute aucune précision au dessin, le document sous-jacent étant souvent bien plus précis que l'annotation.

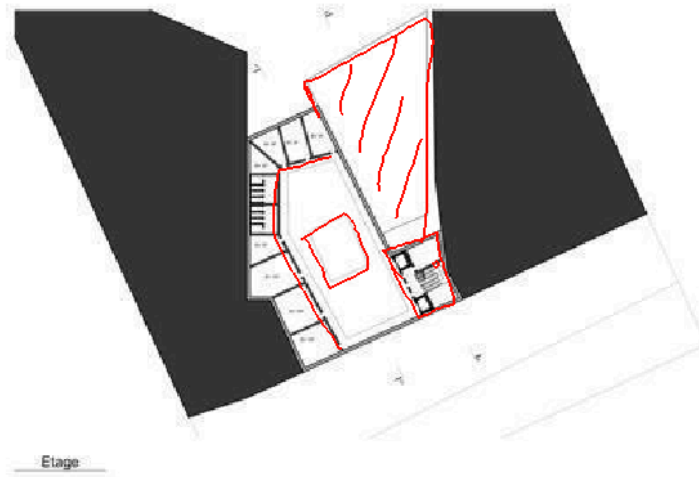


Figure 95
Synthèse du plan par l'identification de zones en rouge.

- Les croquis et annotations sont évidemment aussi utilisés afin de **proposer des idées**. Ces générations de solutions, actes de conception, sont portées par des annotations de type géométrie et informations. Elles peuvent aussi être présentes sur des croquis numériques seconds. Ces idées nouvelles peuvent être directement évaluées visuellement par les membres du groupe et les enseignants.

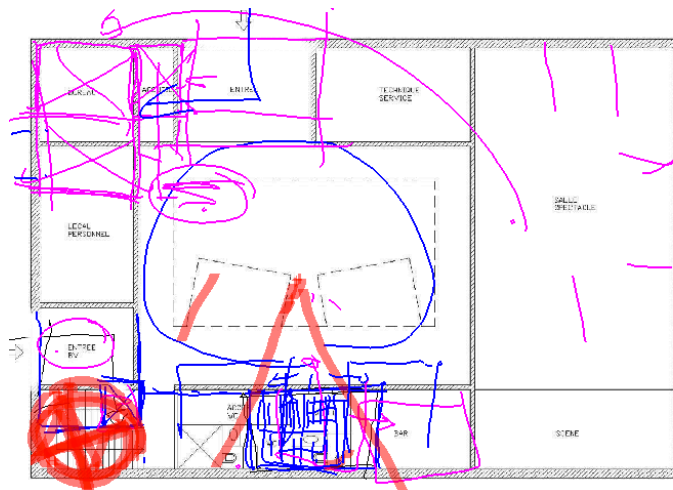


Figure 96
Propositions et modifications. Le travail d'annotation consiste ici à revoir entièrement l'espace bar, l'entrée et le positionnement des bureaux.

Les annotations remplissent parfois plusieurs de ces fonctions, et il n'est pas évident d'établir une correspondance stricte entre la forme de l'annotation et sa fonction. A noter que toutes ces fonctions ont été identifiées dans tous les groupes.

Dans les groupes, on constate aussi que les annotations effectuées par chaque individu sur un même dessin sont souvent tracées dans des couleurs différentes, permettant d'identifier leur

auteur. Ceci est probablement une façon de consigner l'argumentation liée à un dessin. Mais ce comportement n'est pas systématique. Le stylo passe de main en main sur le même site (Liège ou Nancy) et, lorsqu'un participant doit effectuer une annotation rapide, il prend le stylo et dessine sans changer de couleur. Ici aussi on retrouve un principe d'économie : si l'annotation à effectuer est sommaire, le coût d'un changement d'outil virtuel est plus important que les bénéfices engrangés par l'identification de l'auteur de chaque annotation.

Ces différentes fonctions identifiées nous montrent que les annotations numériques dans les séances de collaboration peuvent servir trois buts principaux.

- **Supporter la communication.** Il s'agit principalement de supporter le fil argumentaire du discours, en mettant en évidence les éléments spatiaux auxquels le concepteur se réfère lorsqu'il explique les documents. Il s'agit aussi de suppléer à la modalité gestuelle, faiblement supportée dans notre environnement à distance. L'esquisse numérique permet, à moindre frais, d'effectuer des gestes de pointage éphémères.
- **Supporter la conception** (génération d'idées, jeux de questions-réponses). L'esquisse numérique permet d'exprimer des idées, de modifier des plans, de poser et répondre à des questions, de donner son avis en l'explicitant graphiquement, etc. On observe ainsi des séquences de questions avec pointage, réponses avec des informations, critiques orales et contre-propositions avec des croquis ou des dessins seconds et ce, de manière régulière. La modalité graphique supporte donc les épisodes argumentaires, classiquement observés dans les activités en coprésence.
- **Supporter la construction d'un référentiel commun ou *grounding*.** En ajoutant de l'information non explicitement présente sur les documents, en ajoutant des éléments de contexte et en mettant en rapport plusieurs représentations, les membres du groupe s'assurent que tous comprennent de la même façon l'objet architectural en cours de conception, et partagent une vision commune du projet.

L'esquisse numérique porte donc des fonctions dans toutes les dimensions nécessaires à la conception collaborative : activités centrées vers la tâche, vers le processus et vers la gestion de l'interaction (voir chapitre 2, section 4).

Nous terminons par certains comportements d'annotation ayant été observés uniquement dans le chef de l'enseignante liégeoise⁷⁶. Ces deux comportements supplémentaires, quoique anecdotiques dans leur occurrence, nous apparaissent néanmoins révélateurs d'un mode d'usage du système.

- Les annotations peuvent être utilisées pour **rassembler plusieurs idées**, initialement présentes sur différents documents, sur le même dessin. Dans ce cas, les différentes solutions proposées sont juxtaposées, pour permettre d'en faire une synthèse, servant de base à la comparaison et à la prise de décision. Ce comportement remplit une triple fonction : synthèse des dessins, mise en évidence d'éléments essentiels de ces dessins et support aux comparaisons. Le rassemblement d'idées permet de prendre du recul et d'adopter un autre point de vue sur l'objet de la conception.
- **Création d'un dessin second** (coupe, détails, etc.) **sur un document**, sans qu'il n'y ait de lien géométrique direct entre le dessin et le document. La différence entre ce type d'annotations et ceux identifiés précédemment est leur localisation. L'enseignante en effet n'hésite pas à tracer ces nouveaux dessins sur des documents préexistants sans lien avec l'annotation. Cela dénote d'une relation particulière aux documents et à l'esquisse numérique, que nous détaillons dans le point suivant.

⁷⁶ En comparaison aux étudiants et aux autres enseignants, l'enseignante liégeoise peut être considérée comme experte dans l'utilisation du système : elle est, à ce jour, la personne ayant le plus travaillé sur l'environnement du Studio Digital Collaboratif.

5.6.2. Lien en forme et fonction des annotations

Ces observations nous permettent de tenter de faire un lien entre les différents types d'annotations et leurs fonctions. Sans que ce lien soit totalement univoque, nous pouvons observer certaines tendances.

- Les annotations de type « **géométrie** » sont principalement utilisées pour compléter un document ou le contextualiser, ainsi que pour générer des solutions alternatives. Dans ce dernier rôle, ce type d'annotations est proche de la fonction de l'esquisse numérique sur calque vierge. Elles permettent aussi de modifier le document sur lequel elles sont tracées.
- Les annotations de type « **informations** » permettent principalement de compléter le document par des informations ponctuelles ou de le contextualiser.
- Les annotations de type « **pointage** » servent, sans surprise, à accompagner les locutions déictiques en les situant à même le document. Elles permettent d'attirer des partenaires et de spatialiser le discours. Mais elles permettent aussi d'apporter une informations complémentaire aux documents en faisant des liens entre plusieurs représentations ou plusieurs parties de représentations.
- Enfin, les annotations de type « **surlignage** » soutiennent deux grands types de rôle. D'une part, elles prennent en charge les mêmes rôles que les annotations de pointage et, d'autre part, elles permettent de mettre en œuvre certaines fonctions observées dans le surlignage lors de la mise au net en conception individuelle : simplifier le dessin et prendre des décisions.

5.7. Pratiques différenciées d'annotation

Un élément frappant à l'observation des activités de l'atelier, c'est l'utilisation très variée des croquis numériques, selon les individus et les groupes.

5.7.1. Variabilité entre individus

Sans prétendre à une caractérisation exhaustive des pratiques d'annotation, nous constatons néanmoins que les individus engagés dans les réunions de collaboration à distance adoptent des comportements différents d'annotation, variant sur plusieurs caractéristiques.

- **Pérennité des annotations.** Certains participants suppriment régulièrement, voire systématiquement, leurs annotations à l'aide de la gomme numérique. Il semblerait que cette pérennité des traits soit moins fonction du type d'annotation ou de l'information qu'elle contient, que de son auteur. L'effacement est une pratique individuelle. La plupart des annotations ne sont cependant pas supprimées. Le caractère pérenne des annotations varie aussi au niveau du groupe.
- « **Propreté** » **des traits.** Même si les possibilités graphiques limitées de SketSha ne permettent pas véritablement d'avoir une « patte » graphique, il ressort néanmoins de nos observations que la qualité des croquis effectués sur l'environnement numérique varie selon les individus. Certains participants utilisent beaucoup de traits peu précis, d'autres effectuent des dessins plus « soignés ». Cette différenciation ne nous semble pas provenir des capacités ou habitudes de dessins des individus. Il semblerait que certains participants soient plus enclins à utiliser la trace graphique de manière spontanée, c'est-à-dire qu'ils utilisent le stylo de manière presque systématique en accompagnement du discours, et qu'ils n'hésitent pas à effectuer de nombreuses annotations. D'autres, au contraire, semblent plus prudents dans l'utilisation du stylo numérique, leurs annotations sont donc plus rares et plus soignées.

- **Propriété des documents.** Les annotations se font sur des documents pré-existants, amenés dans l'espace de travail par un participant ou un sous-groupe. Il semble que certains étudiants annotent peu, voire pas du tout, les documents dont ils ne sont pas les auteurs, alors que d'autres n'hésitent pas à dessiner sur des documents qui leur sont présentés. De nouveau, on constate donc deux profils d'attitudes par rapport à l'utilisation des annotations, entre les utilisateurs n'annotant que leurs documents et les autres ne considérant pas la propriété comme un aspect pertinent.
- **Positionnement des annotations.** Certains individus, lorsqu'ils doivent commenter un document dont ils ne sont pas l'auteur, ne dessinent pas ou peu sur celui-ci, préférant tracer des croquis sur des espaces vierges de la feuille virtuelle. D'autres, en revanche, n'hésitent pas à dessiner en surimpression au dessin. Dans cette dernière extrême, on retrouve l'enseignante liégeoise chez qui on peut observer le tracé de croquis en surimpression à des documents non liés à ces dessins.

Sans que nous puissions véritablement qualifier finement les pratiques d'annotation de chacun des individus, nous pouvons néanmoins constater qu'il semble exister deux attitudes différentes face aux annotations.

La première attitude consiste à effectuer de nombreuses annotations de manière très spontanée, directement sur les documents (peu importe qui en est l'auteur) sans les effacer. Il semblerait que pour certains individus (et notamment l'utilisatrice experte qu'est l'enseignante liégeoise), l'annotation soit par essence éphémère et que dès lors, elle peut être utilisée de manière flexible et intense. Il s'agit d'utiliser l'environnement comme un **espace de travail** éphémère, autorisant toutes les compositions, simulations et gestes graphiques.

Dans la seconde attitude, les annotations semblent posséder un caractère informatif et durable. Ainsi, ces utilisateurs annotent peu les dessins des autres, utilisent la gomme et font des dessins plus précis. C'est le cas notamment de l'enseignant nancéien, expert lui aussi dans l'utilisation du système. Il s'agit d'utiliser l'environnement comme un **éditeur de documents**. Dans cette optique, les utilisateurs « respectent » les documents, et ne dessinent dessus que pour y ajouter une information pertinente. C'est ainsi que les dessins sont plus soignés, et que les activités de pointage sont plutôt prises en charge par les gestes que par les annotations de type pointage.

Ces deux attitudes dépendent du groupe dans lequel les individus sont engagés ainsi que de l'auteur du document. Quand ils annotent leurs propres documents, les étudiants ont plus tendance à se positionner dans une optique « espace de travail » : ils n'hésitent pas à annoter leurs documents rapidement et intensément. Cette pratique est peut-être aussi due à des préférences personnelles, comme en témoigne l'utilisation très différente de la modalité graphique par les deux enseignants.

Ces pratiques différenciées de dessin ont déjà été observées par Détienne *et al.*, 2006, qui constatent que, lors d'une réunion en coprésence sans outil numérique, un des participants a tendance à effectuer régulièrement ce que les auteurs appellent un « dessin virtuel », c'est-à-dire un dessin tracé dans l'espace avec la main ou la pointe du stylo, mais sans laisser de trace graphique. Ce comportement serait du même ordre que ceux observés dans l'attitude d'édition de documents : le document original ne serait modifié qu'avec parcimonie, certaines générations d'idées pouvant prendre une autre forme que graphique (ici, en l'occurrence, par la gestuelle).

Enfin, il est à noter que le dispositif possède une fonction de « pelure », qui permet de séparer les annotations numériques d'un document sur lequel elles ont été tracées. Cette fonction autorise donc l'utilisation intensive du croquis numérique, qui peut être dissocié de l'image tout en étant

conservé, et constitue une des augmentations du croquis numérique. Cependant, cette fonctionnalité est très peu utilisée dans les groupes observés.

5.7.2. Variabilité selon le groupe

Nous observons que les comportements d'annotation varient principalement entre les groupes. Pour certains groupes, les annotations produites dans le SDC ne sont pas récupérées par les étudiants. Elles portent en elles un caractère intrinsèquement éphémère et c'est plus le processus qui compte que le résultat. D'autres groupes en revanche, exportent, récupèrent et conservent les documents annotés. Dans ce cas, il semble que les annotations soient considérées comme porteuses d'informations cohérentes et utiles pour la conception.

D'une manière générale, le groupe 1 utilise l'esquisse numérique à des fins de présentation : les documents sont amenés dans l'espace de travail par les différents concepteurs, et chacun explique à tour de rôle leur contenu en utilisant le croquis comme support de présentation. Les concepteurs surlignent des parties essentielles des documents, ajoutent des éléments d'information pour les expliciter ou effectuent des pointages pour mettre en évidence les éléments des dessins auxquels ils font référence. Des jeux de questions-réponses ont régulièrement lieu entre les étudiants ou avec les enseignants, et les annotations numériques sont utilisées pour identifier les éléments des documents sur lesquels porte la discussion. Globalement, il y a peu d'ajouts d'informations par les étudiants, ce rôle étant plutôt tenu par les enseignants. La plupart du temps dans ce groupe, les documents ne sont annotés que par leur auteur et les enseignants.

Ces pratiques sont probablement dues au mode de fonctionnement du groupe. Comme évoqué précédemment, le groupe 1 est caractérisé par une gestion assez décentralisée de la conception. Ainsi, l'essentiel du travail de conception est effectué de manière individuelle, et les séances de travail collectif sont utilisées pour coordonner les actions de chacun. En outre, plusieurs projets parallèles perdurent assez longtemps dans le groupe, qui tarde à faire le choix d'un unique concept. Les séances de travail collectif sont donc principalement utilisées par les étudiants pour communiquer les choix effectués individuellement et les faire valider par le groupe et les enseignants. Les annotations sont principalement mobilisées dans un but de communication et de construction d'une vision partagée du projet. La génération de solutions prend place individuellement durant la semaine et les réunions synchrones sont mises à profit pour les évaluer. Les étudiants sont plutôt dans une optique d'édition de documents.

Le groupe 2, en revanche, est caractérisé par un mode de fonctionnement bien différent. Très rapidement, le groupe a choisi un unique concept pour son projet et les réunions sur le SDC sont mises à profit pour résoudre des questions importantes, pour proposer des idées et prendre des décisions structurantes. Ici, les comportements d'annotation sont dirigés vers la conception : beaucoup de nouvelles informations sont amenées dans l'espace de travail, par des annotations de type « conception » et des croquis SketSha (voir points 5.3 et 5.4 pour des évaluations chiffrées). Les étudiants passent une partie beaucoup moins importante de leur temps à se présenter mutuellement des documents, au profit de la génération de solutions et de la prise de décision collectives. La feuille de dessin partagée et virtuelle est un espace de simulation commun. Les différents documents sont annotés par tous, témoignant d'un réel partage des représentations. Tous les membres de ce groupe adoptent résolument une attitude d'espace de travail dans leur utilisation du système.

L'accent est mis ici sur la génération et la critique d'idées nouvelles. L'esquisse numérique est utilisée moins comme un instrument d'annotation de documents préexistants, que comme un instrument de conception. Les séances synchrones sur le SDC sont des lieux privilégiés de génération de solutions et d'évaluations partielles. La mise au net des dessins, et toutes les fonctions qu'elle remplit (précision, réduction de l'ambiguïté, choix entre plusieurs solutions

possibles, etc. voir chapitre 5, section 5) est plutôt prise en charge dans les moments de travail asynchrone.

Le groupe 3 est également caractérisé par un fonctionnement différent. Les annotations sont quasi exclusivement prises en charge par les auteurs du document, dans le but de convaincre leurs partenaires. Comme dans le groupe 1, les étudiants du groupe 3 se présentent mutuellement leurs travaux, mais il y a peu d'interactions au sein du groupe. L'essentiel des discussions se tient entre l'étudiant présentant ses travaux et les enseignants. Ces discussions sont parfois ponctuées de questions-réponses de la part des autres participants. Ici, il ne s'agit pas de générer des solutions ensemble, ni même de les évaluer collectivement, il s'agit de convaincre ses partenaires. L'esquisse numérique tient essentiellement un rôle de soutien à la présentation des documents, d'où la prévalence des annotations de type pointage, observée dans l'analyse des représentations. Les erreurs sont mal détectées et mal récupérées : l'analyse approfondie des propositions n'a que rarement lieu. Ce qui explique probablement le plus faible résultat obtenu par le groupe.

Ce mode de fonctionnement engendre, ou est engendré par, un climat de conflit au sein du groupe. Il s'accompagne d'une impossibilité à s'accorder sur un concept ou une vision commune du projet. Des ambiguïtés et désaccords sur le projet persistent jusqu'à la fin de l'atelier, que ni les séances de collaboration synchrone, ni le nombre très important de mails échangés entre les séances, ni même l'intervention des enseignants, n'arrivent à résoudre. C'est ainsi que sous l'impulsion de l'encadrement, et suite au conflit, le groupe est tenu d'adopter une organisation très découpée et un partage des tâches très strict pour la fin de l'atelier.

6. Discussion

6.1. Synthèse : comparaison des modes de collaboration dans les trois groupes

Le tableau 24 dresse la comparaison entre les trois groupes, sur plusieurs variables : leur mode de collaboration (degré de couplage), les types de représentations principalement utilisés, l'usage des annotations, les répartitions des actions de conception entre les étapes de travail synchrone et asynchrone, l'utilisation de l'espace de dessin partagé et la qualité de la collaboration.

GR	Mode de collaboration	Représentations	Annotations	Actions de conception	Utilisation de SketSha	Qualité de la collaboration
GR 1	Conception distribuée	Beaucoup. Principalement plans CAO.	Peu de contenu ajouté. Essentiellement surlignage : présentation et prise de décision.	Génération asynchrone. Décisions synchrones.	Edition de documents.	Moyenne.

GR	Mode de collaboration	Représentations	Annotations	Actions de conception	Utilisation de SketSha	Qualité de la collaboration
GR 2	Co-conception	Peu. Principalement esquisses numériques.	Beaucoup de contenu ajouté. Essentiellement géométrie et informations : génération de solutions.	Génération synchrone. Mise au net asynchrone.	Espace de travail.	Bonne.
GR 3	Conception distribuée	Beaucoup. Principalement croquis papier et modèles 3D.	Peu de contenu ajouté. Essentiellement pointage (présentation).	Génération et décisions asynchrones. Justifications synchrones.	Edition de documents.	Faible.

Tableau 24
Comparaisons entre les trois groupes.

Ces comparaisons montrent clairement des profils différents de collaboration, accompagnés par des modes d'utilisation du croquis numérique. Ces différentes dimensions nous semblent proposer une certaine cohérence : le groupe 1 agit sur un mode de collaboration peu couplé et tire profit des instruments d'esquisses numériques pour coordonner son action. Le groupe 2 est caractérisé par une collaboration très couplée et utilise le dispositif pour concevoir collectivement. Le troisième groupe est caractérisé par un conflit dès le début de la conception, conflit qui tend à s'envenimer, la distance empêchant sa gestion saine. L'utilisation de modalité graphique s'aligne sur ce climat de groupe et est principalement utilisée pour convaincre.

Il est néanmoins difficile d'établir des liens de causalité entre les différents comportements de collaboration. Alors qu'il est probable que ce soit le type de collaboration installée dans le groupe qui va déterminer l'usage qui est fait du dispositif de partage de croquis, il n'est pas à exclure que les premiers tracés et dessins en commun influencent également les modes de coordination mis en place. Le mode de collaboration très couplé dans le groupe 2 est probablement dû à la facilité avec laquelle ses membres se sont accordés sur leurs concepts de base. Cet accord a peut-être été rendu possible par la présence de la modalité graphique partagée ou par une attitude envers cette modalité, les incitant à l'utiliser pour générer du contenu. Dans tous les cas, SketSha et le Bureau Virtuel se sont montrés aptes à soutenir les différents modes de collaboration.

Nos observations nous invitent à insister sur la nécessité d'une vision commune du projet. En effet, ce qui distingue principalement les groupes, c'est leur capacité à s'accorder sur un concept commun en début de processus : le groupe 2 parvient à se mettre d'accord dès le début, le groupe 1 prend plusieurs semaines pour ce faire et le groupe 3 n'y parvient jamais. De notre point de vue, c'est cette vision commune, ce référentiel commun qui est le facteur explicatif principal du succès ou de l'échec de la collaboration et des modes de travail mis en place.

Toutefois, au niveau du produit de la conception, les groupes 1 et 2 obtiennent la même note finale, alors qu'ils ont des profils de collaboration bien différenciés. Les deux grands type de collaboration mis en place (co-conception ou conception distribuée) semblent donc appropriés pour la réalisation d'un produit de qualité.

6.2. L'utilité de l'esquisse numérique comme instrument de collaboration

Nos observations montrent que la modalité graphique est relativement polyvalente dans sa manière de soutenir la conception collaborative. Elle est utilisée aussi bien en support aux versions « fortes » de la collaboration que pour les versions « faibles ». De ce fait, si l'outil est utile en revue de projet et pour la coordination des acteurs, il permet potentiellement aussi de soutenir la co-conception par la possibilité de dessiner ensemble sur le même espace de travail. Les analyses que nous avons effectuées montrent que l'usage de l'esquisse est très différent d'un groupe à l'autre, dans ces deux versions de la collaboration. Pour les uns, elle est un instrument versatile, permettant toutes les compositions et tous les modes d'expression, favorisant l'échange entre les partenaires via un « espace de simulation ». Pour les autres, l'esquisse est un moyen de véhiculer des informations en complément à des documents pré-établis dans le but de favoriser la coordination des acteurs autour des représentations. Elle est ici principalement un outil d'« édition de documents ».

Ainsi, le *pattern* d'utilisation de l'esquisse peut être en soi un moyen de décrire la collaboration : l'utilisation de l'esquisse numérique résume à elle seule les différences observées dans les groupes.

Dans nos observations, l'usage intensif de l'esquisse pour proposer de nouvelles idées via des annotations de type « géométrie » ou « informations », ou via le tracé de croquis indépendants, est un signe comportemental d'une collaboration très couplée, telle qu'observée dans le groupe 2. Elle intervient aussi dans une collaboration de qualité, selon le modèle que nous avons utilisé.

L'usage d'annotations de type « surlignage » semble être un vecteur de coordination dans les groupes, et de prise de décision collective. Le surlignage est en effet le mode d'annotation majoritairement utilisé dans le groupe 1. Cette forme d'annotation serait caractéristique d'une prise de décision collective : aucun contenu n'est spécifiquement ajouté, mais le dessin est synthétisé pour en faire ressortir les éléments principaux. Dans ce sens, ce mode d'annotation est très proche de la mise au net observée dans les activités individuelles (voir chapitre 5, section 5).

Enfin, l'usage de l'esquisse essentiellement à des fins de pointage est aussi un signe d'une certaine activité collaborative centrée sur la communication d'informations. Ces esquisses semblent porter le discours ou l'explication plutôt que la prise de décision ou la génération de solutions. Leur utilisation massive dans le groupe 3 caractérise un rapport de communication unilatéral. Chacun, à tour de rôle, présente ses documents, sans que de nouvelles solutions soient générées ou que des décisions soient prises.

Bien entendu, nous forçons ici le trait : chacun de ces modes d'annotation est utilisé par tous les groupes, mais dans des proportions différentes.

Nous avons montré que le Studio Digital Collaboratif, particulièrement par l'intermédiaire de la modalité graphique, est un outil efficace en soutien à l'activité collaborative dans ses différentes dimensions, que nous listons ci-dessous.

- **Activités centrées sur la tâche.** Un des avantages principaux du partage d'esquisse est qu'il permet de gérer les contraintes de manière directe et efficace, à même le dessin. Les différents modes de propagation de contraintes identifiés par Darses (1992, voir chapitre 2, section 2.2.2)

sont observés dans les activités d'annotation. La « propagation linéaire hiérarchique », consistant à transformer des critères abstraits en éléments concrets, est portée par la possibilité d'adopter de bas niveaux d'abstraction dans la communication, c'est-à-dire d'utiliser des formes concrètes et analogiques de dessin pour s'exprimer. Des annotations de type « géométrie » permettent aux concepteurs de transcrire des réflexions de haut niveau sous forme graphique à même les documents. Les surlignages, dans les comportements que nous avons observés, permettent de regrouper des contraintes en simplifiant les dessins, ou de faire apparaître des contraintes présentes dans plusieurs lieux du bâtiment (« regroupement de contraintes »). La trace graphique permet enfin, à moindre coût, d'expérimenter des stratégies pour la résolution de ces contraintes (« simulation »). Tout comme l'esquisse papier en usage individuel, l'esquisse numérique partagée est donc un outil polyvalent pour gérer les différentes contraintes et pour avancer dans la conception. Mais elle permet ici de mener cette gestion de manière collective et à distance.

- **Awareness.** La modalité graphique permet de soutenir l'*awareness*, notamment car elle se substitue en partie aux gestes de pointage. Sur le système, les annotations de pointage seraient même moins ambiguës et plus faciles que les gestes remplissant la même fonction. Ces derniers doivent en réalité être inférés à partir de l'image présente sur la visioconférence, découplée de l'image de l'espace de travail. En revanche, le dispositif ne permet pas de disposer de zones privées de représentation, ayant comme effet majeur que les participants se construisent parfois cet espace privé par l'intermédiaire de carnets de notes ou de feuilles réelles, non visibles à distance. Cet état de fait a un potentiel néfaste sur la conscience que les individus ont des actions des uns et des autres, c'est-à-dire l'*action awareness* (Carroll *et al.*, 2003, voir chapitre 2, point 4.4.2).
- **Gestion des interactions.** L'environnement du SDC, et la présence de la modalité graphique en particulier, facilitent la gestion des interactions. Tout d'abord, comme évoqué précédemment (voir point 5.2 du présent chapitre), les contraintes de l'environnement favorisent une certaine fluidité dans la collaboration et dans la gestion des tours de parole. L'environnement permet d'assurer un échange d'informations constant en dupliquant l'espace de travail sur les deux sites distants. Les deux environnements affichent les mêmes informations au même moment. Ceci a un effet clair sur la qualité de la collaboration, notamment sur l'échange d'informations et le soutien à une compréhension mutuelle. Les nombreuses annotations déictiques observées (pointage et, dans une certaine mesure surlignage) se rapprochent des rapports multimodaux observés classiquement dans des réunions de coprésence (voir Falzon, 1994) : la modalité graphique accompagne et complète le discours pour faciliter la transmission du message. L'utilisation de couleurs différenciées permet d'identifier les auteurs des annotations et, en corollaire, d'explicitier visuellement les points de vue complémentaires sur l'objet.
- **Référentiel commun.** Le dispositif permet, selon nos observations, de maintenir un référentiel commun dans les groupes. L'utilisation de la modalité graphique pour s'approprier et commenter des documents soutient le processus argumentaire, l'échange d'informations et la synchronisation cognitive. Le média graphique permet d'assurer une continuité dans la communication, évitant les ruptures dans l'intelligibilité mutuelle. Mais il ne semble pas permettre la construction première de ce référentiel commun. En ce sens, et en tous cas pour des interlocuteurs qui ne se connaissent pas, le dispositif ne peut remplacer la coprésence. L'esquisse numérique et l'environnement du SDC ne sont que des instruments de communication. Même s'ils permettent de supporter une variété de comportements, ils ne sont pas en soi un générateur de qualité de la collaboration. Ceci est consistant avec les recommandations d'Olson & Olson (2000) qui insistent sur la nécessité de disposer déjà d'un haut degré de *common ground* et d'une culture de la collaboration pour que les technologies de communication à distance puissent correctement supporter le travail collaboratif.
- **Aspects sociaux.** Enfin, et parallèlement à la remarque précédente, les comportements que nous avons observés lors des séances de collaboration étaient quasi exclusivement tournés vers

la tâche. Or, ce *focus* sur la tâche n'est pas suffisant pour pouvoir maintenir une qualité de travail : le climat du groupe est aussi un élément essentiel. Les comportements centrés sur le climat (humour, discussions informelles, etc.) semblent beaucoup plus compliqués à mettre spontanément en place à distance, même via un dispositif multimodal. Cette difficulté est en partie due à l'outil, qui permet surtout les échanges formels via une gestion stricte des tours de parole. Mais elle est aussi due à la structure de l'atelier, circonscrite dans le temps et l'espace, qui ne permet pas de moments d'échanges informels avant et après les réunions. Or ces échanges sont reconnus comme facilitateurs du processus collaboratif et du partage du contexte (Olson & Olson, 2000). Néanmoins, nous avons observé certains comportements plus rares visant à maintenir ou à créer une bonne ambiance dans le groupe⁷⁷. De nouveau, la polyvalence de l'outil semble permettre ces communications à caractère social, mais elle ne les encourage pas. La distance semble d'ailleurs un élément très handicapant pour la création d'une ambiance conviviale et de camaraderie dans les groupes. Pour créer de bonnes bases et un climat sain, il est nécessaire de vivre des moments en coprésence.

6.3. Utilisation des différentes représentations en conception

Dans nos observations, l'usage préférentiel de certains types de documents par les différents groupes, et les liens forts entre les représentations utilisées et l'avancement du processus, nous incitent à penser que chaque type de document (texte, modèle 3D, croquis papier, etc.) remplit un rôle particulier dans la conception.

- Les textes seraient avant tout efficaces de manière asynchrone pour maintenir à jour un référentiel commun. En situation synchrone, leur lecture est consommatrice de temps et donc peu efficace. Les textes servent surtout à mettre en contexte les images importées.
- Les images et photographies sont essentiellement voire exclusivement utilisées pour l'inspiration dans les phases créatives. Elles sont inutiles si le groupe est déjà d'accord sur un concept. À elle seule, l'utilisation des images peut renseigner sur l'état d'avancement du groupe.
- Les esquisses papier, en tant qu'instruments d'expression souples, ne sont utilisées collectivement que dans les premières réunions. Très rapidement, elles sont supplantées par d'autres modes de représentation, moins ambigus. Dès que le concept est un peu plus affiné, cette ambiguïté est moins souhaitable pour porter la prise de décision. L'import de documents en papier est aussi plus compliqué dans l'environnement : ils doivent être scannés avant de pouvoir être utilisés dans l'espace de travail.
- Les modèles 3D (ici sous forme d'images statiques de modèles importées dans l'environnement), au contraire, sont plutôt utilisés dans les dernières réunions. Ils tendent peu à peu à remplacer les esquisses papier pour la représentation de caractéristiques essentiellement visuelles du bâtiment. À noter que leur usage intensif est lié à la demande des enseignants.
- Les représentations CAO/DAO (ici aussi sous forme d'images statiques importées) sont très souples et polyvalentes. À l'exception des toutes premières réunions, elles sont utilisées en quantité et sont massivement annotées. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette observation. Tout d'abord, les plans DAO sont effectivement des moyens de convoier quantité d'informations et constituent des supports privilégiés pour une communication entre architectes. Leur caractère fini permet une expression d'idées univoques et facilite sans doute l'échange de points de vue. Ce qui fait leur faiblesse pour une utilisation individuelle (le caractère complet, fini et non ambigu) constitue probablement une force dans un usage collectif. Ces documents numériques sont aussi plus simples à échanger dans l'environnement virtuel que les autres modes d'expression tels que les croquis papier (qui doivent être scannés) ou les modèles 3D (qui doivent être exportés sous forme d'images fixes). Enfin, notre grille d'analyse surévalue probablement un peu

⁷⁷ À titre d'exemple, un des groupes a importé dans l'espace de travail partagé du SDC une photo de l'un de ses membres et les étudiants ont tracé au stylo électronique des dessins humoristiques sur cette photo.

leur utilisation : nous avons en effet classé dans cette catégorie tout dessin effectué avec un logiciel de CAO ou de DAO, sans distinction de type ou de contenu. Or, ce sont ces modes de représentation qui possèdent la plus grande variabilité sur ces points.

- Sans surprise, les maquettes en carton ne sont pas utilisées dans notre dispositif. Les possibilités nouvelles d'impression 3D, de plus en plus étendues, ouvriront peut-être prochainement la voie au partage asynchrone d'objets tangibles.

Il semble, au vu de nos observations, que c'est surtout la flexibilité dans l'usage des représentations qui est importante. Cette adaptation forte des représentations en fonction du temps est une caractéristique discriminante du groupe 2, qui est sans doute un vecteur important de son efficacité.

Enfin, nous avons aussi pu confirmer les tendances observées dans la littérature : les représentations évoluent globalement vers plus de précision et vers un plus bas niveau d'abstraction. C'est ainsi que les schémas conceptuels et les croquis d'ébauche disparaissent progressivement pour laisser la place à des plans et modèles précis et finis.

6.4. Critique méthodologique

Notre étude comporte évidemment plusieurs limites. D'une part, certaines d'entre elles sont inhérentes aux situations étudiées : le faible nombre de sujets (trois groupes de cinq) ainsi que la spécificité de l'atelier donnent à certaines généralisations un caractère hypothétique. D'autre part, le contexte particulier et, notamment, la forte pression temporelle rendent l'exercice singulier. Néanmoins, la démarche d'analyse de protocoles que nous avons mise en place est éclairante à de nombreux points de vue.

Nous évoquons ci-dessous les forces et faiblesses de chacune des méthodes utilisées dans cette étude.

6.4.1. Grille de la qualité de la collaboration

La grille, telle que nous l'avons utilisée, semble systématiquement attribuer des scores moins importants aux activités impliquant plutôt de la conception distribuée que de la co-conception. En effet, le groupe 2 obtient de très bons scores, sauf en fin de processus, alors que les groupes 1 et 3 obtiennent des scores plus bas, à l'exception de la séance de travail suivant la présentation intermédiaire, séance nécessitant d'intégrer les différentes remarques et de revisiter les concepts sur cette base. Ce constat est probablement dû à l'importance accordée à la prise de décision et à l'équilibre des contributions, qui, si elles sont nécessaires dans des situations de co-conception, sont moins importantes dans des situations de conception distribuée. En effet, dans ces dernières, les problèmes doivent être exposés par leurs responsables effectifs et la prise de décision peut être différée à un travail individuel. Ainsi, le modèle sous-jacent de cette grille, est basé sur des versions « fortes » de la collaboration.

Ce constat n'est pas vraiment handicapant dans la mesure où la grille est conçue et appliquée dans des situations d'apprentissage. Cet aspect du modèle sous-jacent doit néanmoins être explicitement évoqué lors de son utilisation. Par contre, pour une application dans le domaine professionnel, où les situations de co-conception ne sont pas la norme, la grille pourrait être en partie revue. Pour ce faire, les différents critères pourraient être pondérés différemment, voire revus dans leur composition pour prendre en compte le caractère distribué de l'activité collaborative. Ainsi, des critères tels que la balance des contributions pourraient être supprimés

tandis que ceux de répartition des tâches ou gestion des compétences pourraient être mis en exergue. Cet ajustement nécessite cependant une approche empirique dans le domaine professionnel pour être pertinent.

Une faiblesse de la grille est qu'elle ne prend pas en compte les facteurs socio-émotionnels de la collaboration. Ainsi, les scores obtenus par le groupe 3 ne reflètent pas l'ampleur du conflit prenant place dans ce collectif. Les scores obtenus sont à peine inférieurs à ceux des groupes précédents, alors que nos observations en situation ont montré un climat qualitativement bien différent des deux autres groupes. Il nous semble donc nécessaire d'intégrer les aspects socio-émotionnels dans la grille, pour prendre en compte la collaboration dans son aspect global. Cette amélioration est actuellement en cours dans les équipes ayant créé cette grille, et nous collaborons avec eux pour ce faire⁷⁸.

Une deuxième faiblesse est liée au caractère peu discriminant de cette grille. En effet, quels que soient les groupes et les réunions, les scores sont relativement élevés. Ceci est, de notre point de vue, dû à l'importance accordée, au sein de chacune des dimensions, à l'aspect matériel de la collaboration. Environ un tiers des questions est explicitement dirigé vers l'utilisation des outils : fluidité dans l'échange du stylo, échanges d'informations sur l'état du système, etc. Or, les réponses à ces questions sont presque toujours affirmatives. Si ceci nous renseigne évidemment sur les capacités de l'outil à supporter la collaboration à distance, cela diminue néanmoins la pertinence des comparaisons entre groupes ou entre les réunions prenant place sur le même système. Cette grille pourrait donc être adaptée ou « calibrée » par rapport aux objectifs propres de chacune des situations étudiées, pour être plus discriminante. Dans des contextes technologiques complexes, cette composante prend toute son importance. Dans des contextes peu outillés, ou outillés avec des dispositifs aisés à maîtriser comme c'est le cas ici, ces critères pourraient être pondérés différemment, pour laisser une plus grande part du score à l'activité collaborative à proprement parler.

6.4.2. Analyse des traces graphiques

De notre point de vue, l'analyse des traces graphiques que nous avons effectuée présente trois limites principales.

La première est liée au caractère non exhaustif de nos observations. Pour des raisons techniques, nous n'avons pu effectuer l'analyse des dessins que sur base des fichiers SketSha enregistrés à la fin des réunions. Ainsi, les fichiers ou annotations effacés n'ont pu être pris en compte. Ceux-ci sont cependant peu nombreux, les analyses d'activités montrant le caractère plutôt rare de l'effacement ou de la suppression de calques.

La deuxième limite est liée à la difficulté d'interprétation des traces statiques de l'activité. Si les différents documents peuvent aisément être identifiés et classés, ce n'est pas le cas des annotations. Coupées de leur contexte, leur classification ne peut être que sommaire et s'avère parfois laborieuse. Ainsi, des annotations de conception peuvent très bien comprendre des surlignages, des informations et des annotations de pointage, sans qu'il soit possible de les identifier uniquement sur base du document fini et de manière univoque. Cette imprécision rend délicate toute tentative explicite de faire des liens entre les caractéristiques graphiques des

⁷⁸ Les équipes travaillant à cette grille sont le LTCI - Laboratoire Traitement et Communication de l'Information, Télécom ParisTech (UMR 5141 - CNRS, F. Détienne) et le LATI - Laboratoire Adaptation Travail Individu, Université Paris Descartes (J.-M. Burkhardt). Nous collaborons avec eux depuis 2006 par l'intermédiaire de projets de collaboration transnationale Wallonie-France (CGRI). La réflexion sur les aspects socio-affectifs est l'objet d'un mémoire de Master à l'Université Paris Descartes.

annotations et leurs fonctions dans l'activité collaborative. L'analyse de l'activité sur base de vidéos s'avère donc essentielle pour compléter et interpréter ces données.

Ces deux premières limites mettent en avant la nécessité d'adopter une vision dynamique de l'activité de dessin et d'annotation. Les types et formats d'annotations doivent être remis dans leur contexte pour être vraiment compris. Pour cette raison, nous avons complété nos analyses statiques par une analyse dynamique. L'idéal serait de coupler les deux, c'est-à-dire de classer les annotations sur base de l'analyse des vidéos. Ceci n'a pu être réalisé dans le cadre de cette étude compte tenu, d'une part, de la faible qualité des vidéos, ne permettant pas d'appréhender précisément les traces graphiques⁷⁹ et, d'autre part, de la durée importante de l'atelier, nécessitant un travail conséquent pour une analyse exhaustive. L'approche que nous avons mise en place - analyse statique exhaustive complétée de « coups de sonde » d'analyse de l'activité - nous semble néanmoins un bon compromis pour parvenir à une compréhension fine de l'activité.

La troisième limite de notre méthode tient au fait que nous n'avons pris en compte que les documents échangés lors des séances de collaboration synchrone. Il n'est pas à exclure que les documents échangés par mail ou via la plate-forme de gestion de données, entre deux séances de collaboration, soient de nature différente. Cependant, compte tenu des modes de collaboration décrits par les différents groupes, nous pensons qu'il s'agit globalement des mêmes documents. Une analyse complémentaire des modes de collaboration asynchrone devrait permettre d'éclairer un peu mieux le rôle des représentations externes et de l'esquisse numérique comme vecteurs de collaboration.

6.4.3. Analyse des annotations

Dans le but de mieux comprendre l'utilisation de l'esquisse numérique dans des situations collectives, nous avons mis en place des analyses d'activités centrées sur les comportements d'annotation. Ces analyses adoptaient un point de vue fonctionnel sur ces activités et ont été effectuées sur base d'un échantillonnage de moments d'annotation dans chacun des groupes. Nous avons ainsi pu identifier plusieurs fonctions pour les annotations et avons montré deux attitudes principales dans l'utilisation de l'environnement graphique partagé : comme un outil d'édition de documents ou comme un espace de travail éphémère.

Néanmoins, ces observations ne nous permettent pas d'aller plus loin que l'étape de la description. La nature même de l'analyse ainsi que la complexité des situations étudiées rendent difficile, voire impossible, l'établissement d'un lien explicite entre forme et fonction des annotations, ou entre comportements d'annotation et individus. Une analyse plus systématique pourrait être mise en place pour compléter ces données. Cependant, notre étude constitue un premier pas nécessaire vers des approches plus précises et quantitatives de ces comportements d'annotation.

6.5. Amélioration du dispositif pédagogique

Cette étude nous permet, à la lumière de nos observations, de proposer un certain nombre de pistes pour modifier la structure de l'atelier, en vue d'offrir aux étudiants une expérience de collaboration optimale favorisant leurs apprentissages. Si ces recommandations sortent du cadre strict de l'étude des usages de l'esquisse numérique, il nous semble cependant opportun, compte

⁷⁹ A noter que ce levier sera prochainement levé par la mise en place au LUCID d'une régie efficace pour la collecte de vidéos d'activités collaboratives (financement ULg crédit d'équipement).

tenu de nos constats sur les modes de collaboration des étudiants, de donner au staff pédagogique un *feedback* sur la structure de l'atelier.

Nous pensons que le dispositif pédagogique doit soutenir des visions fortes de la collaboration. C'est en effet une des possibilités qui doit être selon nous fournie à des étudiants durant leur formation. Pour ce faire, plusieurs pistes peuvent être envisagées.

Tout d'abord, l'utilisation des esquisses en réunions synchrones devrait être encouragée. Pour ce faire, la contrainte temporelle pourrait être revue. Celle-ci, réduisant strictement à une heure les réunions sur le dispositif, semble limiter les possibilités d'action. Dédoubler cette séance ou l'allonger pourrait être une piste. Fournir aux étudiants des dispositifs minimalistes de collaboration multimodale (en fournissant le visioconférence et SketSha avec une tablette graphique sur leurs ordinateurs personnels) en est une autre.

Dans le même ordre d'idées, nous avons constaté deux manières bien distinctes d'appréhender le dispositif. Certains des utilisateurs s'en servent comme un espace éphémère de travail partagé, alors que d'autres semblent considérer que les annotations affectent et modifient les documents sous-jacents. Or, le groupe manifestant des comportements de co-conception est clairement dans la première optique. Une formation sur les possibilités d'action sur le logiciel avec une mise en exergue de l'indépendance entre l'annotation et le document-cible, permettrait probablement de faire évoluer l'utilisation de l'environnement en un espace de travail partagé.

La dissymétrie dans les ressources allouées à l'atelier dans les deux institutions est un problème potentiel pour les étudiants. Cette dissymétrie doit être gérée explicitement par le staff encadrant, sous peine de potentiellement générer certaines tensions au sein des groupes.

La présence de l'enseignant aux séances de collaboration synchrone doit également être sujette à discussion. En effet, l'enseignant prend beaucoup de place dans le dispositif. Il mobilise un temps de parole et d'action conséquent au sein du groupe. Tout en gardant une certaine neutralité, il régule son comportement en fonction des modes de collaboration du groupe, pour maintenir le processus dans un état de qualité constant (Safin, Verschuere, Burkhardt & Détienne, 2010 ; Safin, Verschuere, Burkhardt, Détienne, *et al.*, 2010). Si la présence des enseignants est extrêmement bénéfique, autant pour la qualité des projets que pour la collaboration des groupes, il est regrettable que les étudiants ne puissent utiliser le dispositif pour gérer les aspects plus « quotidiens » de leur collaboration, sans les encadrants. La séance en Bureau Virtuel pourrait ainsi être dédoublée pour permettre aux groupes de recevoir les *feedbacks* de leurs enseignants lors d'une séance hebdomadaire et, lors d'une autre séance, de concevoir ensemble sur le même dessin. L'idée du dispositif minimaliste pourrait aussi intervenir pour ce faire.

L'atelier est, pour la majeure partie des étudiants, un premier contact avec la collaboration en conception, ses avantages, ses contraintes et ses difficultés. Pour leur permettre d'effectuer un maximum d'apprentissages sur leurs savoir-faire et savoir-être en situation de collaboration, ainsi que pour leur permettre de mieux comprendre la mécanique des activités collaboratives, les analyses réflexives doivent être, selon nous, encouragées. Celles-ci sont relativement sommaires pour le moment. Les méthodes développées et utilisées ici, notamment sur la qualité de la collaboration, pourraient être adaptées pour devenir des instruments d'auto-évaluation favorisant la réflexivité.

Enfin, et c'est sans doute une des plus grandes critiques du dispositif, les étudiants ont manqué de contacts en face-à-face. En effet, de notre point de vue, le plus grand critère explicatif du succès du groupe 2 est lié à son démarrage efficace : dès le début de l'atelier, les étudiants de ce groupe

ont réussi à se mettre d'accord sur un concept et ses déclinaisons, et à le faire rapidement valider par les enseignants. Les autres groupes ont éprouvé des difficultés bien plus importantes. Notamment, beaucoup d'incompréhensions, de conflits ou d'hésitations sont dus au fait que les étudiants ne se connaissaient pas avant de démarrer. En effet, le partage d'un contexte commun (Olson & Olson, 2000) et un modèle du partenaire (Falzon, 1994) sont des éléments essentiels pour la collaboration. Des contacts informels dans les groupes doivent, de notre point de vue, être une des plus grandes priorités de la journée de démarrage. Les groupes devraient être ainsi constitués en début de journée, avant la présentation du contexte. Des exercices de présentation pourraient être mis en place et un événement social devrait être préféré aux réunions de travail.

6.6. Améliorations du dispositif technologique

Notre étude n'a pas spécifiquement pris pour cible l'évaluation de l'interface du logiciel SketSha. Néanmoins, l'usage intensif qui en a été fait lors de l'atelier est tout de même éclairant à ce sujet. Nous listons ici une série de recommandations pour l'amélioration de l'environnement du SDC.

Tout d'abord, il nous faut noter que certaines améliorations doivent lui être apportées sur le plan strict de l'interaction : la palette de calques peut prêter à confusion et devrait être revue et les modes d'interaction avec le *widget* de manipulation, qui sont parfois source d'erreurs, pourraient être améliorés. Nous ne rentrons pas ici dans le détail de ces considérations, qui sortent du cadre de ce travail.

Quatre autres aspects de l'environnement du Studio Digital Collaboratif retiennent principalement notre attention : sa connectivité avec le monde réel, la richesse de son expression graphique, la création d'outils dédiés et la réflexion organisationnelle liée à son usage.

Ainsi, Scaife & Rogers (1996) proposent plusieurs recommandations pour la conception de représentations graphiques sur des systèmes interactifs.

- Favoriser la visibilité et le caractère explicite des représentations. Il convient de sélectionner quels éléments doivent être saillants, compte tenu de la tâche, et quels « indices perceptuels » doivent être fournis.
- Proposer des représentations interactives qui peuvent supporter une fonction de « trace cognitive ». Les annotations ont ici un rôle intéressant à jouer.
- Préférer des représentations avec une certaine facilité de production : il est plus aisé de comprendre un diagramme quand on maîtrise sa construction.
- Combiner des types de représentations externes différentes.
- Permettre de partager pour aboutir à des représentations graphiques distribuées.

Premièrement, comme nous l'avons vu, la collaboration dans l'atelier est portée par de nombreux documents de nature très différente, de niveaux de détails variables et ayant chacun une utilité particulière dans la conception. La flexibilité dans l'usage de ces diverses représentations est un gage d'une collaboration de qualité. Cela est consistant avec Scaife & Rogers (1996), qui suggèrent que « l'efficacité représentationnelle » vient de la possibilité de combiner plusieurs représentations de types variés. Les environnements de collaboration doivent de ce point de vue être ouverts, c'est-à-dire permettre des échanges avec le monde réel et les autres outils de représentation. Il est donc essentiel que tous ces documents puissent être importés de manière fluide dans SketSha. La diversité des formats d'importation, la facilité et l'immédiateté de l'import sont des éléments essentiels pour que le logiciel puisse supporter des versions fortes de la collaboration. En outre, les modes d'export ne sont pas très efficaces actuellement : le logiciel ne permet de ne générer qu'un document PDF à la fois ; l'impression, aussi, doit s'effectuer page par

page ; et le fichier SketSha contenant tous les documents n'est, quant à lui, pas utilisable en dehors du logiciel. Un travail essentiel de connectivité est donc à réaliser dans le logiciel, afin que celui-ci s'intègre harmonieusement aux autres pratiques de travail.

Deuxièmement, comme nous l'avons déjà identifié pour l'usage des interfaces-esquisses dans la conception individuelle, un effort particulier doit selon nous être dirigé vers la création d'outils pour favoriser une expression graphique riche. Actuellement, le logiciel ne permet que très difficilement l'écriture ou le dessin « figuratif ». Ceci est dû à l'uniformité des traits et à certains décalibrages, réduisant la précision. Ce défaut lié à l'expression graphique nous semble cependant plus lié au dispositif matériel que logiciel. Le Bureau Virtuel possède en effet une surface de travail très large, ce qui réduit *de facto* sa résolution. L'utilisation de tablettes-écran de format A3, sans avoir été testée de manière systématique, nous semble pallier à ce problème. Ces tablettes ne permettent pas en revanche de travailler à plusieurs sur le même espace co-localisé, et ne supportent donc que la communication en tête à tête. Pour pouvoir cependant utiliser un dispositif de grande taille, celui-ci devrait permettre plus de nuances dans l'expression. La prise en compte de la pression ou l'inclinaison du stylo pour le tracé, actuellement indisponibles sur des environnements de grande taille, ou encore l'utilisation des projecteurs de future génération à très haute résolution devraient permettre de pallier à ce problème.

Troisièmement, l'utilisation de l'environnement comme « espace de travail » est portée par de nombreuses annotations souvent à caractère éphémère (mais persistantes dans SketSha) alors que son utilisation comme « outil d'édition de documents » est soutenue par la pérennité de ces annotations.

Scaife & Rogers (1996) insistent sur la nécessité de pouvoir supporter une fonction de trace cognitive dans la collaboration. Or, dans un des deux fonctionnements différenciés, cette trace n'existe pas car elle est supplantée par une utilisation de l'environnement comme un espace de travail temporaire, par ailleurs très efficace en soutien à la collaboration. Les productions graphiques dans SketSha ne sont pas très réutilisables : les annotations de pointage et certains surlignages sont des informations inutiles en dehors du cadre strict de la réunion.

Dédicacer des outils permettrait sans doute de faire coexister ces deux modes de fonctionnement. Le pointage et les informations de contextualisation du dessin pourraient être effectués par des outils spécifiques permettant de laisser une trace éphémère sur le dessin. Cependant, dédicacer des outils virtuels aux différents comportements d'annotation nous semble aller à l'encontre de l'aspect « invisible » de l'environnement.

Une autre piste se situe dans le développement d'interacteurs complémentaires pour effectuer les annotations de pointage. Elles pourraient par exemple être prises en charge par un dispositif de reconnaissance gestuelle (Vandamme *et al.* 2007) permettant de reconnaître les gestes de pointage effectués à la main. Dans le même ordre d'idée, une fonction de trace temporaire (« comète ») est actuellement à l'étude. Celle-ci permettrait de laisser une trace temporaire derrière le pointeur lorsque l'utilisateur déplace le stylo à proximité de la table sans dessiner, permettant ainsi d'effectuer des gestes de pointage avec la pointe du stylo, la trace laissée par ces gestes s'effaçant après quelques secondes.

Enfin, nous devons noter que l'utilisation du dispositif doit aussi être pensée dans une optique organisationnelle : le dispositif synchrone crée en effet de nouvelles pratiques. Il ne peut remplacer, selon nous, les réunions de coprésence. Mais il peut fournir un support pour une organisation de la collaboration sur un mode plus couplé permettant, à moindre frais, des réunions régulières entre acteurs distants. Un des utilisateurs professionnels du système a d'ailleurs souligné le bouleversement que l'introduction de ce dispositif peut engendrer dans les organisations : en permettant des contacts quotidiens, les rapports de pouvoir sont rééquilibrés, notamment quand le processus est scindé entre une équipe de « conception », responsable de la

définition du bâtiment, distante d'une équipe « sur site », chargée de la gestion du chantier et des adaptations locales nécessaires. L'introduction du dispositif permet d'impliquer de manière bien plus forte ces équipes locales au cœur même de la conception (voir Safin & Leclercq, 2009). Cependant, si ces potentialités peuvent paraître séduisantes, la remise en cause des structures de décision et la création de nouveaux modes de travail et de nouvelles responsabilités induites par les technologies de collaboration peuvent potentiellement mener à leur rejet (Gronier *et al.*, 2000). Il convient dès lors, pour une utilisation du dispositif en contexte professionnel, d'accompagner sa mise en œuvre par des réflexions d'ordre organisationnel.

7. Conclusion

Cette étude est originale à plus d'un titre : elle aborde spécifiquement l'usage de la modalité graphique en conception, elle étudie les comportements d'annotations de documents et elle le fait en adoptant un point de vue longitudinal. Le contexte dans lequel s'est déroulée s'est étude est unique en son genre. Compte tenu de ces originalités, elle se veut surtout être un premier pas dans l'identification des fonctions cognitives portées par le dessin numérique partagé.

L'étude prend un point de vue centré sur les usages du dispositif original qu'est le Studio Digital Collaboratif. Elle nous renseigne de manière approfondie sur l'utilisation qui est spontanément faite du dispositif dans des situations de collaboration. Les situations observées montrent une intrication complexe de multiples facteurs pour expliquer les comportements collaboratifs, l'utilisation des représentations externes et des esquisses numériques, et la qualité du processus.

Cette étude nous permet d'envisager la critique de deux hypothèses.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

Ici encore, comme en conception individuelle, on constate que les contraintes sur le dessin dans l'environnement numérique impliquent une restriction de l'expressivité graphique. On n'observe ni texte, ni dessins graphiquement élaborés. En revanche, au point de vue fonctionnel, les annotations numériques sont utilisées de manière polyvalente notamment pour suppléer des gestes de pointage.

Hypothèse 3 : l'esquisse numérique, en tant que modalité particulière de communication distante, permet de soutenir des versions « fortes » de la collaboration.

Nos observations montrent qu'effectivement, la modalité graphique de communication permet de soutenir des versions fortes de la collaboration. L'usage du stylo électronique et de l'esquisse numérique dans la communication distante permet de soutenir les différentes activités nécessaires à la conception collaborative et ce, de manière polyvalente. Cependant, la présence de la modalité graphique ne semble pas inciter en soi les concepteurs à collaborer de manière couplée.

Nous observons que les comportements d'annotation sont surtout utilisés pour soutenir la conception telle que mise en place spontanément dans les groupes. Ils nous renseignent donc aussi sur les facteurs de succès d'une collaboration de qualité.

Notre étude a certaines limites qui ne permettent pas de conclure de manière définitive quant aux hypothèses, mais elle propose des pistes d'interprétation des comportements d'esquisse. Ainsi, fort de ce bagage, nous pourrions mettre en place des approches plus systématiques de l'analyse de l'utilisation des documents et des annotations, par la comparaison de situations différentes (à distance vs. en coprésence ou avec vs. sans la modalité graphique) et par l'utilisation d'approches quantitatives et inférentielles. Nous pourrions ainsi déterminer le « poids » relatif des différentes fonctions de l'annotation dans le processus collaboratif.

Dans cette étude, nous avons cherché à comprendre le rôle de l'esquisse numérique en tant que modalité graphique dans la communication à distance et son rôle dans la collaboration. Pour ce faire, nous nous basons sur plusieurs types d'analyse de l'activité collaborative de trois groupes d'étudiants engagés dans un processus de conception collectif à distance pendant douze semaines.

Dans un premier temps, nous décrivons l'activité collaborative des trois groupes. Celle-ci apparaît bien différente : le premier groupe est engagé dans un processus de conception décentralisé (conception distribuée) et parvient à un résultat de bonne qualité. Le deuxième groupe est caractérisé par une gestion très couplée du processus, une excellente qualité de la collaboration et un résultat tout aussi satisfaisant que le premier groupe. Le troisième groupe, en revanche, obtient un résultat plus faible notamment car leur activité collaborative est caractérisée par un conflit d'importance. Ces différences très fortes entre les trois groupes nous permettent de comparer l'usage de l'esquisse numérique en fonction du type d'activité collaborative mise en place.

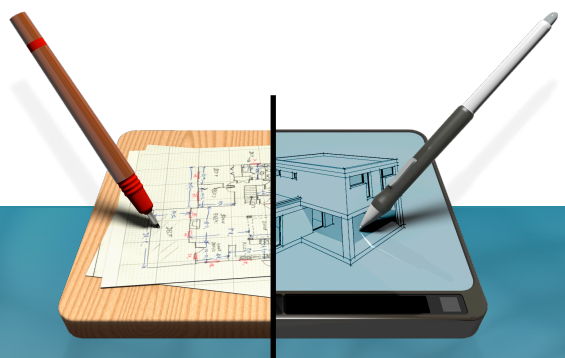
Ensuite, nous caractérisons et comptabilisons l'ensemble des documents échangés par les étudiants lors des séances de collaboration, dans le but de situer l'usage du dessin numérique parmi tous ces fichiers d'échange. Nous montrons que chaque type de représentation externe possède des fonctions et utilités propres dans le processus de conception. L'esquisse numérique, quant à elle, permet tout au long du processus un échange d'idées entre les partenaires et est particulièrement exploitée en soutien à des versions couplées de la collaboration.

Nous abordons dans un troisième temps spécifiquement l'activité d'annotation de documents. Sur base d'une analyse quantitative et d'une analyse d'activité, nous identifions les différentes fonctions portées par les annotations : compléter un document, synthétiser un dessin, attirer l'attention des partenaires sur des référents spatialisés, contextualiser des informations, etc. Nous montrons qu'en fonction des modes de collaboration installés dans le groupe, deux attitudes d'utilisation des annotations numériques sont observables : l'une consiste à éditer des documents, à les compléter et à les modifier, l'autre vise à disposer d'un espace de travail éphémère, orienté vers le débat et la génération de solutions multiples.

Nous discutons enfin de ces résultats en les mettant en rapport les uns avec les autres, critiquons nos méthodes et proposons des pistes de développement pour les interfaces-esquisses visant à soutenir la collaboration, et des améliorations du dispositif pédagogique que nous avons observé.

CHAPITRE 7

Conclusions



1. Discussion générale

Les trois études que nous avons menées nous permettent de mieux saisir le rôle cognitif porté par l'esquisse numérique en conception. Nous évoquons ci-dessous les différentes avancées dans ce domaine que ce travail propose. Dans un premier temps, nous synthétisons globalement notre approche, puis nous envisageons les réflexions transversales que les trois études nous invitent à mettre en place.

1.1. Synthèse de notre approche

Ce travail vise à mieux comprendre les mécanismes d'externalisation graphiques dans les activités cognitives complexes, telles que la conception. Il a pour point d'entrée la notion d'esquisse numérique. Dans la littérature scientifique, cette notion est abordée d'un point de vue essentiellement technocentré. Les verrous technologiques sont identifiés, mais peu d'études ont tenté de décrire de manière systématique ou approfondie l'impact cognitif de ce mode d'externalisation particulier.

Cette problématique nous semble d'actualité. En effet, nous assistons à un changement de paradigme dans notre rapport à l'informatique et au monde numérique. A l'heure actuelle, les dispositifs d'interaction s'écartent progressivement du paradigme dominant du « tout au clavier-souris ». L'apparition de systèmes multi-tactiles de plus en plus performants, la généralisation des *smartphones* et des tablettes tactiles, le développement d'interfaces à stylo nous invitent à considérer les opportunités, les contraintes et les nouveaux défis que posent ces systèmes en expansion. Les indices du marché font pressentir que l'hégémonie de l'ordinateur personnel est en perte de vitesse et que, même s'il gardera de nombreuses utilités pour des tâches de production, il sera dans un futur proche complété par de nombreuses technologies ubiquitaires aux modalités d'interaction variées⁸⁰. Dans ce cadre, nous interrogeons spécifiquement la notion d'esquisse numérique et d'interaction au stylo électronique.

L'interaction à stylo n'est pas neuve : les démonstrateurs de Sutherland en 1963 basés sur le *light pen* font même du stylo électronique l'ancêtre de la souris. Cependant, les dispositifs développés, à quelques exceptions près, le sont souvent en suivant une approche exclusivement technologique, sans réelles études sur l'impact de ce mode d'interaction et d'externalisation sur l'activité cognitive des individus. Le stylo électronique est souvent considéré par défaut comme un dispositif efficace et aisé à appréhender : puisqu'il reproduit l'usage d'un instrument habituel et « naturel » qu'est le crayon, son usage est posé d'emblée comme simple. Notre recherche vise à nuancer ces affirmations et à investiguer en profondeur les contraintes et les avantages de ce mode d'interaction.

⁸⁰ L'annonce récente du retrait probable de la production de PC par HP, leader mondial, est un signe particulièrement révélateur de ce mouvement. L'avènement de l'iPad et l'essor croissant des diverses tablettes tactiles en est un autre : sans qu'elles répondent à des besoins précis lors de leur développement, elles connaissent un succès grandissant. Même si le clavier et la souris resteront probablement toujours des outils privilégiés et efficaces pour certaines tâches, notamment des tâches de production, l'avenir de l'informatique se situe probablement dans une diversification des modalités d'interaction avec les environnements numériques et virtuels, principalement pour les activités créatives et les tâches de vie quotidienne.

Ce travail a consisté en la réalisation de trois études complémentaires dans lesquelles ont été examinées et comparées l'esquisse papier, l'esquisse numérique, l'interprétation de l'esquisse et la modalité graphique de communication (figure 97). L'approche que nous avons menée repose sur les opportunités que nous avons eues tout au long de ce travail. La mise à disposition de logiciels et d'environnements innovants développés au LUCID, ainsi la mise en place d'un atelier collaboratif à distance entre l'Université de Liège et l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, ont fourni les terrains nécessaires à nos approches empiriques.

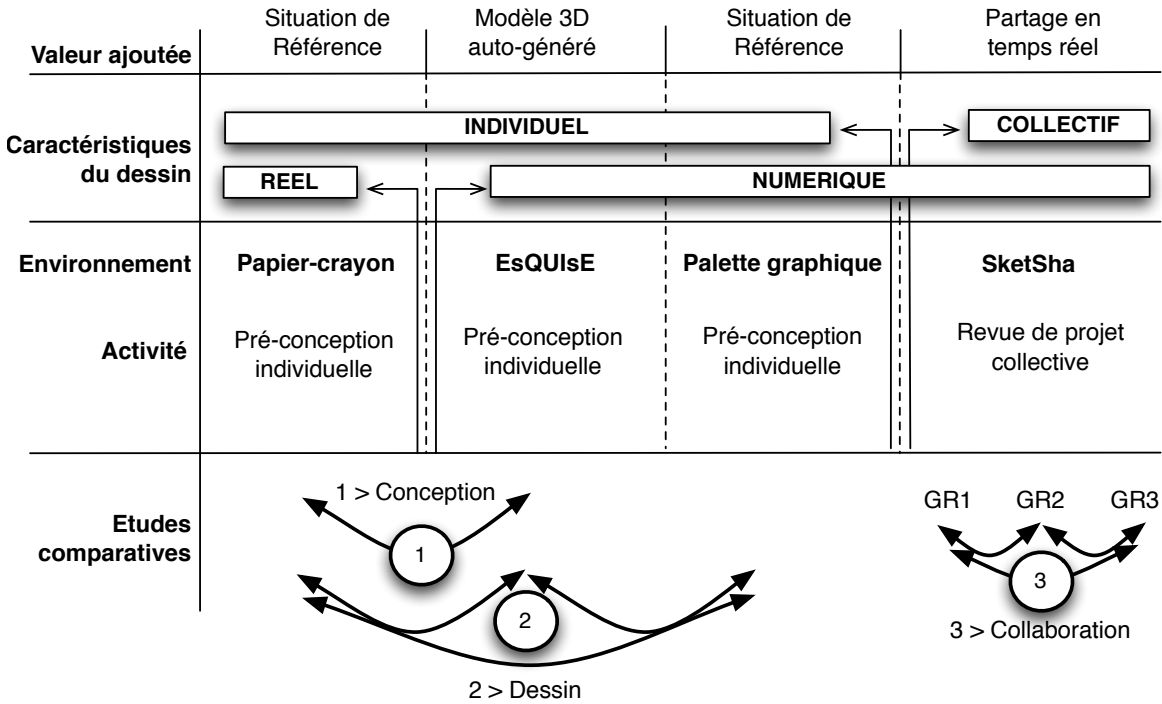


Figure 97

Synthèse des différentes situations comparées dans ce travail, distinguant les quatre types de situations observées en fonction des caractéristiques du dessin, des environnements dans lesquelles elles ont pris place et des activités mobilisées par les concepteurs. Le schéma synthétise aussi les approches comparatives mises en place dans les trois études et l'activité principalement observée.

Ce travail vise à aborder différents volets. Nos questions portent avant tout sur la mécanique de la cognition externe en tentant de comprendre plus en profondeur comment l'activité cognitive tire parti des instruments mis à sa disposition pour être menée à bien. Dans ce cadre, nous avons souhaité étudier de plus près la conception préliminaire en architecture, qui est par essence une discipline externaliste : plans, modèles et dessins sont à la fois les produits et les outils de cette activité. L'esquisse numérique est un outil rencontré dans les laboratoires mais qui peine à intégrer la pratique architecturale courante, malgré toutes les vertus que ses développeurs lui prêtent. Ce type d'outils fournit une situation d'étude intéressante pour mieux comprendre les processus d'externalisation. Il fournit aussi un champ d'application concrète dans lequel nos travaux trouverons, nous l'espérons, une utilité pratique.

Nous abordons deux manières d'envisager le dessin numérique : comme instrument individuel de conception préliminaire, et comme instrument collectif d'annotation de documents. Nous tentons dans cette section de faire le pont entre ces deux types d'activités, qui nous sont apparues comme bien distinctes, malgré qu'elles mobilisent le même type de technologie de dessin numérique.

Une particularité de notre approche de la conception est son *focus* sur l'activité graphique. En effet, l'étude de la conception doit prendre un parti pour décrire les activités et choisir un point de vue particulier. Par exemple, la méthode du linkograph (Van der Lugt, 2000, Bilda *et al.*, 2006, Bilda & Gero, 2008) permet de suivre le fil des idées de conception. Tang *et al.* (2003) mesurent le niveau d'abstraction des dessins pour décrire l'activité et ses évolutions. L'originalité de notre approche est que nous observons et décrivons l'activité cognitive de conception par l'intermédiaire de la production de représentations externes et par l'identification des caractéristiques graphiques de ces représentations, contrairement aux approches classiques, qui l'appréhendent au travers des productions verbales des concepteurs.

Nous avons structuré nos questions de recherche autour de trois hypothèses, portant respectivement sur les caractéristiques graphiques des dessins numériques à main levée, sur l'apport de l'interprétation des croquis et sur le rôle de la modalité graphique comme vecteur de la collaboration. Ces hypothèses couvrent les questions principales relatives à la recherche et au développement dans le domaine du soutien à la conception sur base de croquis numérique. Dans cette section, nous développons les réponses globales à nos hypothèses. Nous abordons aussi d'autres problématiques spécifiques ayant émergé de nos observations, telles que la prise de décision en conception, le rôle de l'activité de mise au net ou encore l'affinement du concept d'esquisse de conception. Nous tentons aussi de décrire l'apport de ce travail dans le champ du *design cognition*. Enfin, nous dressons des pistes de recommandations pour le développement de dispositifs d'esquisse numérique avant de conclure sur les limites de notre travail et sur ses perspectives.

1.2. L'esquisse numérique n'est pas un dispositif intrinsèquement naturel. Il est porteur de contraintes.

A la lumière de nos études, l'hypothèse 1 de ce travail peut être validée.

Hypothèse 1 : le stylo électronique possède des contraintes propres, qui limitent les possibilités expressives et rendent le croquis numérique différent de l'esquisse papier-crayon.

En effet, nos observations montrent que l'esquisse numérique actuelle ne possède pas la même capacité expressive que les dessins sur papier-crayon traditionnels. Cette limitation de l'expressivité graphique est due à certaines contraintes du système, et en particulier à trois aspects.

- **La faible résolution du dispositif du Bureau Virtuel.** Celui-ci comprend un projecteur suspendu et affiche une image en haute définition, comparable à celle d'un bon écran, mais sur une surface d'environ un mètre de large. Cette taille importante implique nécessairement que les pixels soient plus grands que sur un dispositif de plus petite taille tel qu'un écran d'ordinateur (ils sont environ deux fois plus grands qu'un écran standard). La taille des traits étant directement liée à la taille des pixels, ils sont relativement larges et en tous cas bien plus larges que des traits effectués à la pointe de crayon sur papier. Cette taille importante ne permet pas les nuances que l'on retrouve sur l'esquisse papier. L'utilisation d'autres dispositifs d'affichage et de capture permettrait sans doute de pallier en tout ou en partie ces problèmes : les tablettes écrans que nous utilisons parfois pour faire tourner nos logiciels possèdent la même résolution, mais sur un format A3. Sur ces tablettes, nous avons déjà observé dans d'autres contextes l'utilisation massive de texte et le tracé de dessins expressifs.
- **Des problèmes de calibrage.** Sur le Bureau Virtuel, il peut y avoir un léger décalage entre la pointe du stylo et le curseur qu'il manipule. Ce décalage n'est pas nécessairement gênant pour

du dessin d'esquisse, mais est problématique pour l'écriture, composée d'une multitude de petits traits proches les uns des autres. De nouveau, d'autres dispositifs tels que les tablettes-écrans, permettent de pallier à ces problèmes de décalage.

- **Le manque de variété de traits autorisés par le système.** Les différents traits sont de taille standard : deux pixels de large pour les traits de crayon virtuel et cinq pour les surligneurs. De même, la saturation des couleurs est constante et ne dépend ni de l'inclinaison ni de la pression du stylo. Certains dispositifs de dessin numérique, comme celui utilisé par Tang *et al.* (2010) et le système TraGeRe⁸¹, permettent de tracer des dessins qui sont visuellement très proches des croquis sur papier. Néanmoins, ces dispositifs se limitent à une approche purement graphique : les traits affichés sont composés de pixels « allumés » sur le dispositif. Mais l'interprétation du dessin nécessite de traiter un nombre limité de traits synthétisés et pas un nombre important de pixels. De même, pour garantir la transmission instantanée et cryptée du dessin par un simple réseau internet, la quantité d'informations doit être limitée à des paquets de données compacts, des traits synthétisés, pour garantir l'interaction en temps réel des espaces de travail distants. Dès lors, la synthèse implique une certaine uniformisation des traits.

Ces limitations d'ordre technique impliquent une modification de l'activité de dessin dans le chef des concepteurs. Les dessins sont plus larges, comprennent moins de traits et ne cherchent pas une expression esthétique. Cette expression esthétique est souvent difficile à mettre en place dans des environnements d'esquisse numérique (voir Koutamanis, 2005). L'écriture est aussi compliquée à effectuer car la taille des traits, leur manque de variété et l'imprécision de la calibration ne supportent pas réellement le tracé de petits traits rapprochés, caractéristique de l'écriture. De plus, les traits d'écriture ne supportent pas bien les fonctions de zoom : sans reconnaissance et mise au net des caractères écrits, le zoom peut déformer fortement les éléments textuels. En conséquence, les concepteurs écrivent très peu, voire pas du tout, dans les environnements d'esquisse⁸². Les contraintes du système encouragent donc certains comportements et en découragent d'autres. Il est à noter que le dispositif n'empêche pas réellement d'écrire ou de tracer des dessins « fouillés ». Il rend ces actions plus difficiles, implique une plus grande concentration et une plus grande application. Dans un but d'efficacité, ces comportements sont donc abandonnés par les concepteurs.

D'une manière générale, nos observations ont mis en évidence une certaine flexibilité cognitive, guidée par un rapport économique et une recherche d'efficacité. En effet, les contraintes propres au dispositif d'esquisse numérique impliquent un certain « coût » pour l'activité de dessin.

- Comme évoqué, les possibilités expressives sont limitées dans les systèmes d'esquisse numérique, ce qui crée des contraintes pour l'activité comme la difficulté à effectuer certains types de dessins, engendrant un **coût opératoire**.
- Les croquis doivent être plus grands, ce qui engendre un **coût physique** pour les tracer, l'espace de travail étant plus proche du A0 que du A3 observé en conception sur papier-crayon.
- Compte tenu de ces contraintes et de la taille du dessin, l'activité graphique est plus lente sur croquis numérique, ce qui engendre un **coût temporel**.

⁸¹ Le programme TraGeRe pour « Tracé Générique Réaliste » est un projet de recherche mené au LUCID proposant de simuler dans un environnement numérique, notamment par la prise en compte de l'inclinaison et de la pression du stylo, l'interaction entre une mine de graphite et une feuille de papier. Ce projet a abouti à un démonstrateur permettant de rapprocher les possibilités expressive du dessin numérique de celles du dessin papier-crayon.

⁸² A noter que l'absence de texte dans nos observations doit être relativisée. En effet, ce type d'annotations est relativement peu fréquent en conception : Boujut *et al.* (2006) en comptabilisent environ 10% lors de leurs expérimentations, qui portent sur la conception mécanique, domaine dans lequel les concepteurs ne sont pas formés au dessin, contrairement à l'architecture. Le texte ne serait donc pas pratique courante pour concevoir de manière collective. Néanmoins, nous n'avons identifié qu'une seule annotation textuelle sur les 727 représentations comptabilisées dans l'étude 3, ce qui est largement en-deçà de la proportion observée par Boujut et ses collaborateurs.

Ces coûts sont mis en relation avec les bénéfices apportés par les dispositifs d'esquisse numérique. Dans les cas que nous avons observés, ils sont de trois ordres (voir chapitre 3, point 1.3).

- Des augmentations liées à l'interprétation du croquis, comme le modèle 3D auto-généré.
- Des augmentations liées au partage de croquis, comme la communication synchrone distante.
- Des augmentations liées au papier numérique, comme la gestion simplifiée de la superposition des calques et la transparence paramétrable.

Les opérations cognitives mobilisées par les concepteurs répondent à une logique d'efficacité : si les coûts ou limitations associés à un comportement sont supérieures aux bénéfices que celui-ci procure, ce comportement tend à être abandonné. C'est ainsi que dans l'étude 2, nous avons remarqué que l'utilisation du dessin était très différente dans les trois situations comparées.

Pour le papier-crayon, l'esquisse est peu coûteuse, relativement naturelle et automatique. Outre cette immédiateté dans l'externalisation, elle permet un grand nombre d'avantages clairement identifiés dans la littérature : variation du niveau d'abstraction, réinterprétation, allègement de la charge mnésique, etc. (voir chapitre 2, point 3.3). Nous avons observé, dans les activités outillées par ces instruments naturels, une intense activité de dessin et un grand nombre de productions graphiques de toutes sortes.

L'esquisse numérique sans interprétation engendre un certain coût au dessin, compte tenu des contraintes évoquées plus haut. On observe une réduction progressive de l'activité de dessin et, à partir de la seconde moitié de l'activité, une disparition des esquisses conceptuelles au profit exclusif des esquisses synthétiques. Il semble que dans les premières étapes de la conception, les dessins conceptuels soient essentiels pour mener à bien l'activité. Malgré les contraintes manifestes sur le dessin, les productions graphiques sont nombreuses car elles permettent d'éprouver certains concepts, de générer des idées en toute liberté et de manière souple. Mais, dès que les bases du bâtiment sont définitivement choisies, la production de dessins change : les concepteurs ne tracent plus de croquis conceptuels mais centrent leur dessin uniquement sur des esquisses synthétiques. A mesure que le concept s'affine, les esquisses conceptuelles deviennent moins importantes et les bénéfices apportés par ce type de croquis ne parviennent pas à compenser le coût de leur production. Les esquisses synthétiques sont quant à elles maintenues, car leur rôle de fixation d'informations est nécessaire aux concepteurs.

Lorsqu'un retour d'interprétation est proposé au concepteur, sous la forme d'un modèle 3D dans notre cas, on ne constate pas de diminution de l'activité de dessin. En effet, certaines contraintes pèsent sur les dessins nets, qui ne peuvent être modifiés de manière récurrente, au risque de produire un modèle 3D erroné ou incomplet. Dès lors, la seule expression graphique possible est le dessin conceptuel. Malgré les contraintes liées à l'expression, ce média continue à être utilisé dans le cours de l'activité.

Il semblerait donc que l'activité de dessin d'esquisses en conception soit utilisée de manière flexible par les concepteurs et que sa mise en place soit soumise à un rapport entre les contraintes et le coût physique et cognitif d'une part, et les bénéfices pour l'activité d'autre part.

1.3. La présence de représentations externes auto-générées change radicalement la structure de la tâche.

La deuxième hypothèse de ce travail peut aussi être confirmée.

Hypothèse 2 : les représentations générées automatiquement par un logiciel ont un impact structurant sur l'activité.

Nos observations montrent clairement un impact de la présence du modèle 3D sur l'activité. Pour que ce modèle soit créé et soit cohérent, les concepteurs doivent en effet suivre un certain nombre de règles, que nous détaillons ici.

- Pour recevoir un modèle 3D précis, il est nécessaire que les dessins sur lesquels est construit ce modèle soient relativement précis et soignés. Il est donc nécessaire d'utiliser des dessins synthétiques pour générer le modèle. Ces dessins doivent être clairement identifiés et dissociés des esquisses conceptuelles.
- Pour obtenir un modèle complet, tous les étages du bâtiment doivent avoir été esquissés. Cela implique que le concepteur doive assez rapidement, en tous cas dès qu'il souhaite visualiser la 3D, disposer de dessins synthétiques de chacun des étages du bâtiment sur des calques différents.
- Pour disposer d'un modèle éditable, les croquis synthétiques doivent pouvoir être modifiés. Pour ce faire, ces dessins ne doivent pas être surchargés. Cela implique de devoir séparer les dessins conceptuels des dessins synthétiques.
- Pour bénéficier d'un modèle cohérent, il est nécessaire de superposer les calques dans un ordre précis. Cette superposition précise implique de ne pas perturber trop souvent l'ordre et l'agencement des calques. Afin de respecter cette règle, il est plus économique d'effectuer l'ensemble des dessins sur un calque de brouillon unique plutôt que de multiplier les calques. Ceci est particulièrement vrai lorsque la 3D est affichée en permanence, où d'éventuelles incohérences sont directement perceptibles et peuvent déranger le concepteur.

Ces quatre règles imposées structurent ainsi le comportement des concepteurs sur EsQUIsE. Mais il est à noter qu'elles ne structurent pas que les modalités d'interaction avec le dessin ou avec l'environnement numérique : elles structurent en fait l'ensemble de l'activité. On observe en effet plusieurs impacts de l'interprétation sur les comportements de dessin et de conception.

- Les dessins synthétiques et conceptuels sont spatialement distincts, répartis sur des calques différents.
- L'enchaînement des dessins est très différent par rapport au dessin papier : tous les étages sont conçus sur un même calque de brouillon, puis les informations de ce calque sont mises au net sur les différents calques des étages.
- L'activité est formellement découpée entre des phases de génération d'idées et des phases d'évaluation.
- Le bâtiment est conçu de manière différente : tous les étages sont mis au net et définis en même temps.
- La gestion des contraintes est aussi impactée par la présence de la 3D. Celle-ci s'effectue de manière centralisée quand il y a interprétation, alors qu'elle se fait par essais et erreurs et au coup par coup dans les activités papier-crayon.

L'interprétation de croquis engendre donc un ensemble de règles de fonctionnement du logiciel, qui impliquent des méthodes d'utilisation qui elles-mêmes structurent le comportement. Le logiciel et la représentation externe auto-générée changent la structure de la tâche. Ces règles pourraient être contournées pour permettre à l'utilisateur de mener son activité de manière habituelle. Elles

pourraient aussi ne pas être respectées, le logiciel affichant dans ce cas une 3D incohérente ou pas de 3D du tout. Néanmoins, les concepteurs choisissent de contraindre leur activité afin de tirer parti de la 3D. Nous ne pouvons exclure que cette volonté d'utiliser le modèle soit due à un « effet gadget » induit par le logiciel. Mais nous pouvons aussi penser que la 3D est réellement utile, en particulier pour des étudiants. En effet, les phases d'évaluation qu'ils mettent explicitement en place utilisent le modèle comme ressource.

Nos observations sont comparables à celles de Lim (2003), qui montre que la présence d'une interprétation modifie en profondeur l'organisation temporelle de la conception et les activités d'externalisation (en l'occurrence, il observe l'utilisation fréquente de plus bas niveaux d'abstraction de dessin lorsque celui-ci est interprété).

1.4. L'esquisse numérique est un moyen polyvalent de collaboration

Dans ce travail, nous avons aussi étudié le rôle de l'esquisse en tant que modalité graphique de la conception. La troisième étude aboutit à une conclusion mitigée relative à l'hypothèse 3.

Hypothèse 3 : l'esquisse numérique, en tant que modalité particulière de communication distante, permet de soutenir des versions « fortes » de la collaboration.

Nos observations montrent que l'esquisse numérique et la modalité graphique ne créent pas en soi une plus grande qualité de la collaboration. En effet, bien que l'approche que nous avons utilisée ne permette pas de conclure définitivement à ce sujet, n'ayant pas pu observer de situation de référence, nous avons pu constater que les trois groupes mettaient en place des modes de collaboration bien différents, avec une plus ou moins grande intégration entre les partenaires. La possibilité d'utiliser la modalité graphique ne semble pas en soi inciter à la mise en place de versions intégrées et couplées de la collaboration. En revanche, nous pouvons observer que l'esquisse numérique est une ressource pour tous les modes de collaboration, et peut-être plus encore pour les activités de co-conception, qui tirent particulièrement parti de cette modalité. Le fait que le système propose une collaboration graphique distante permet la collaboration couplée mais ne l'induit pas. Ceci est cohérent avec une étude complémentaire à laquelle nous avons participé⁸³, qui montre qu'il n'y a pas de modification fondamentale de l'activité de conception collaborative suivant qu'elle se passe à distance sur le SDC ou en coprésence sur le même système.

Au vu de nos observations, l'usage de l'esquisse est plutôt un moyen polyvalent d'accomplir toutes les activités nécessaires à la conception collaborative.

- **Les activités centrées sur la tâche.** Les activités de structuration collective du problème sont portées par certains types d'annotations, comme des surlignages ou des pointages. La modalité graphique est bien entendu utilisée intensément pour générer des solutions, grâce à des croquis originaux ou esquisses superposées à des documents importés. Les évaluations des solutions proposées sont mises en contexte avec les différents types d'annotations.
- **Les activités centrées vers le processus.** L'*awareness* est renforcé par une utilisation intensive de l'esquisse, permettant d'identifier les actions en cours et de faire du référencement spatial (pointage) et par l'utilisation des couleurs pour identifier les auteurs des différentes annotations. La communication graphique permet aussi de maintenir un référentiel commun, notamment en permettant l'édition des documents conçus par d'autres et l'utilisation d'un espace partagé d'informations et de travail.

⁸³ Projet ANR Cocréa, rapport interne non publié, LIMISI-CNRS.

- **Les activités de gestion de l'interaction.** La modalité graphique permet de soutenir les autres modalités de communication que sont le regard et surtout la parole, grâce notamment aux annotations de pointage et de surlignage. Elle permet en partie de suppléer la modalité gestuelle, notamment en prenant en charge certaines fonctions déictiques.

L'esquisse numérique partagée est un moyen complémentaire à la mise en commun de documents et à la modalité verbale pour mener à bien les différentes activités collaboratives nécessaires à la conception. Les différents modes d'annotation et de dessin permettent de soutenir des types de collaboration variés. Tout en ayant un rôle relativement polyvalent, le surlignage (majoritaire dans le groupe 1) est plutôt lié à la prise de décision et à la coordination des actions. Les annotations de type « géométrie » ainsi que les croquis numériques sont plutôt associés aux modes de collaboration couplés, de type co-conception (groupe 2). Ils permettent de collectivement générer des idées. Les annotations de pointage servent avant tout un objectif de clarification de la communication. Elles sont utilisées dans le groupe 3 majoritairement, en vue de présenter les décisions préalables.

Enfin, l'esquisse numérique permet de remplir deux rôles importants dans la collaboration : la possibilité d'éditer des documents et la création d'un espace de travail partagé. Le premier rôle est très clairement utile aux activités centrées vers la tâche et la prise de décision. L'esquisse numérique permet d'effectuer un certain nombre de choix, de modifier, par le biais d'annotations, les documents échangés en session de revue de projet et de repartir avec ces notes pour mettre à jour les plans et modèles. Le deuxième rôle est plutôt centré sur le processus et sur la génération de solutions. Il s'agit d'offrir aux concepteurs collaborateurs un espace de travail non contraint leur permettant d'exprimer des idées de manière libre, de simuler des comportements du bâtiment et de construire une connaissance commune par le biais de l'utilisation intensive du dessin. Bien qu'elles ne soient pas exclusives, ces deux pratiques apparaissent cependant relativement dissociées dans les activités que nous avons observées : le choix de l'un ou l'autre de ces rôles serait principalement dicté par un mode de fonctionnement groupal, même s'il repose aussi sur des préférences personnelles ou sur des questions de propriété de documents.

1.5. Atouts de l'esquisse numérique comme mode d'externalisation

Malgré les contraintes que nous avons identifiées, il apparaît que l'esquisse numérique semble être un média d'externalisation pertinent. Scaife & Rogers, dans une synthèse critique des mécanismes de la cognition externe, dressaient en 1996 une liste de cinq grandes recommandations pour le développement de systèmes graphiques, qui nous semblent toujours d'actualité : favoriser la visibilité et le caractère explicite des représentations ; proposer des représentations interactives qui peuvent supporter une fonction de « trace cognitive » ; préférer des représentations dont les utilisateurs maîtrisent les modes de construction ; combiner des types de représentations externes différentes ; proposer des représentations graphiques distribuées.

L'esquisse numérique et les dispositifs que nous avons utilisés dans nos études répondent en grande partie à ces recommandations. Le dessin est un mode de représentation relativement universel. L'usage du stylo est appréhendé dès le plus jeune âge par tous et est même poussé plus en avant lors de la formation supérieure dans le cas de l'architecture. Dans ce sens, les fondements même des dispositifs d'esquisses numériques sont de se reposer sur l'utilisation d'un outil maîtrisé par ses utilisateurs. Malgré les contraintes que nous avons évoquées relatives à la finesse du tracé, il apparaît que le stylo électronique possède l'avantage majeur de sa facilité de prise en main : dans toutes nos observations - relatées ici ou effectuées dans d'autres cadres - le temps d'apprentissage du système est très court. Récemment, nous avons même montré que les utilisateurs confrontés au logiciel SketSha exploitaient plus de la moitié de ses fonctionnalités dès la première session d'usage (Defays *et al.*, *in press*).

L'esquisse numérique conserve surtout une grande partie des avantages de l'esquisse papier. Si ses potentialités graphiques limitées réduisent probablement un peu les phénomènes de réinterprétation ou d'analogies, quoique ces affirmations devraient être vérifiées, nous observons que le croquis numérique permet néanmoins une souplesse dans la construction de l'objet, une imprécision et une ambiguïté, reconnues unanimement comme nécessaires pour la conception créative. Dès lors, s'il est accompagné de propositions pertinentes pour soutenir la conception, le croquis numérique à main levée s'avère selon nous tout à fait approprié comme mode d'interaction, pour peu que certaines recommandations soient suivies (voir point 1.11 du présent chapitre).

Par ailleurs, l'utilisation de ce média en tant qu'outil d'annotations de documents est à plusieurs points très bénéfique : en utilisant la modalité graphique pour collaborer à distance, les documents partagés se voient conférer un caractère interactif. Grâce aux annotations, il est possible de modifier ces documents ensemble et en même temps. Dans l'environnement utilisé, ils deviennent donc des représentations distribuées, sur lesquelles chacun est libre d'agir. L'annotation graphique devient aussi un moyen de conserver une empreinte de la communication et des décisions prises, c'est-à-dire de garder une « trace cognitive » du processus de conception collaborative.

1.6. Activité de conception

Ce travail a aussi pour objectif de capitaliser des connaissances sur les activités de conception, individuelles et collectives. Ainsi, plusieurs de nos observations peuvent être mises en relation avec la littérature sur la conception.

Tout d'abord, nos études permettent de **confirmer des phénomènes déjà reconnus** dans la littérature. Le caractère opportuniste de la conception (Visser, 2006) est observé dans nos études : même pour des publics d'étudiants assez homogènes, il n'existe pas une stratégie unique pour aborder un problème de conception. L'influence forte de l'outil et de la représentation externe auto-générée, qui modifie jusqu'à la structure de raisonnement et l'organisation de l'activité, montre bien le caractère ouvert des stratégies de résolution. En outre, la flexibilité cognitive dont les concepteurs font preuve participe aussi de ce caractère opportuniste et non pré-établi.

Notre étude a aussi permis d'identifier deux stratégies globales de gestion de contraintes en conception préliminaire : une première dite « centralisée », qui consiste à gérer toutes les contraintes en même temps sur un calque unique puis à répartir l'ensemble des décisions sur plusieurs calques, et une stratégie par essais et erreurs, qui consiste à résoudre les contraintes locales, évaluer leur impact une à une sur d'autres parties du bâtiment puis résoudre les contraintes émergentes de la même façon.

Nos études montrent aussi que la conception peut être appréhendée et décrite par la succession des représentations externes générées par les concepteurs.

Notre étude amène aussi des réflexions essentielles sur la conception et sur le **rôle du croquis papier-crayon dans les étapes préliminaires**. Nous avons ainsi identifié, à la suite de Leclercq & Elsen (2007) une différenciation formelle et fonctionnelle entre deux types de dessins. Les premiers, les esquisses conceptuelles, sont des lieux de simulation. Leur production est sous-tendue par un principe d'économie. Les seconds, les esquisses synthétiques, sont des outils de prise de décision et de confrontation des idées au réel. Elles répondent à un principe d'efficacité. Il

ne s'agit donc pas d'une transformation progressive de dessins ambigus vers des dessins équivoques comme décrit par Lebahar (1983) mais bien de l'existence simultanée de ces deux types d'esquisses dans le cours de l'activité de conception. Les outils de dessin influencent leur mise en place et la façon dont elles se succèdent dans le temps. L'activité de mise au net est un élément charnière entre ces deux types de dessins. Lors de cette activité, les esquisses conceptuelles sont transformées en esquisses synthétiques, les décisions structurantes sont prises et la conception est « arrêtée » à un instant t.

Cette différenciation n'est généralement pas opérée dans les études sur l'esquisse en conception, alors qu'elle nous paraît essentielle pour plusieurs raisons.

- Pour l'interprétation de croquis, cette distinction est fondamentale. Il apparaît en effet que les esquisses conceptuelles ne sont pas interprétables car elles sont complexes, ambiguës et comprennent plusieurs solutions potentielles. Les concepteurs tentent même de « cacher » ces dessins à l'interprétation. Les esquisses synthétiques, quant à elles, ont pour vocation au moins en partie d'explicitier l'objet architectural et sont donc plus propices à l'interprétation.
- L'identification de l'esquisse conceptuelle permet aussi en partie d'expliquer l'échec des outils de DAO à assister la conception préliminaire : si les outils de dessin informatisé permettent de porter certaines fonctions des esquisses synthétiques, comme la vérification de la cohérence géométrique, la mise à échelle et la fixation d'éléments, ils ne permettent assurément pas de soutenir les rôles et les fonctions de l'esquisse conceptuelle. En effet, un des avantages de ce mode d'externalisation est la possibilité de composer un objet architectural incohérent, irréaliste, de manière souple et immédiate. Les outils de CAO et de DAO imposent des modalités d'interaction beaucoup trop contraignantes pour supporter le rôle crucial des esquisses conceptuelles.
- La différenciation identifiée montre aussi un certain découplage entre des activités de génération de solutions tout venant et des activités plus formelles de prise de décision, d'évaluation et de (re)cadrage du problème.

En outre, nos études ont permis d'aborder trois types d'activités peu décrites dans la littérature, à savoir la conception en superposition, la mise au net de dessins et l'annotation collaborative à distance.

Nos observations sur la **conception en superposition** montrent la façon dont les étages sont conçus les uns par rapport aux autres. Nos observations sont cependant sans doute grandement influencées par le type d'énoncé, qui nécessite une réflexion particulière sur la superposition des fonctions architecturales. Nous identifions néanmoins deux stratégies bien distinctes de propagation des contraintes sur les différents étages, influencées par le dispositif : la première consiste à travailler par essais et erreurs et à propager les contraintes une à une sur les différents étages et parties du bâtiment ; la seconde consiste à centraliser les informations et contraintes de tous les étages sur le dessin d'un étage de base, à résoudre ces contraintes de manière centralisée, puis à dessiner les différents étages et de vérifier la pertinence de la résolution.

La **mise au net** des dessins est une activité qui s'avère essentielle dans la production graphique des architectes. Cette activité consiste principalement à recadrer le problème de conception (*problem framing*, Schön, 1983) : en choisissant une solution unique parmi les plusieurs proposées, en éprouvant les idées par un dimensionnement plus précis et en réduisant l'ambiguïté du croquis, le concepteur reformule le problème de manière plus précise. Cette mise au net est aussi un moment d'évaluation formel des idées de conception, notamment lorsqu'un retour d'interprétation est présent.

Enfin, dans notre étude de l'**annotation de documents en conception**, nous avons affiné la distinction entre les différents types d'annotations opérée par Boujut *et al.* (2006). Ceux-ci

proposaient de considérer des annotations déictiques et des annotations figuratives. Nous avons étendu cette approche en considérant deux dimensions : la correspondance spatiale avec le document annoté et l'ajout d'informations. Ainsi, les annotations déictiques (pointage) n'apportent pas d'information nouvelle et ont une faible correspondance spatiale avec le document sous-jacent, alors que les annotations figuratives sont généralement géométriquement liées au document et ajoutent de l'information (annotations de type « géométrie » dans notre étude). Outre ces deux catégories, on retrouve des ajouts d'éléments d'informations permettant de contextualiser le dessin, d'en préciser des parties, d'en expliciter des éléments ambigus, sans pour autant que l'on retrouve une activité graphique figurative au sens propre : la forme importe moins que l'idée symbolique qu'elle véhicule (annotations de type « informations »). On retrouve par exemple dans cette catégorie des flèches pour indiquer un sens de circulation, ou l'indication du nord. Enfin, le surlignage (spatialement couplé au document sous-jacent mais n'ajoutant pas d'information nouvelle) permet d'effectuer plusieurs opérations : souligner le discours en identifiant des parties du dessin (fonction déictique), mettre en correspondance des documents différents (cette fonction est nommée annotation associative dans l'annotation de textes, voir Zacklad, 2006), synthétiser et simplifier un dessin en identifiant les zones importantes, et enfin fixer et expliciter des décisions. Dans ce dernier rôle, l'annotation de type surlignage est proche du surlignage observé fréquemment lors de la mise au net de dessins en conception individuelle.

Enfin, comme évoqué précédemment, ce travail a permis de mettre en lumière le principe de **flexibilité cognitive** dans la conception, proche de celui d'opportunisme, et a montré que cette flexibilité était influencée par un rapport économique entre les coûts et contraintes d'une part, et les bénéfices et la valeur ajoutée d'autre part. Ces observations vont dans le sens des études de psychologie cognitive relatives aux représentations externes qui montrent que les modes de retrait et d'encodage de l'information sont guidés par un principe d'économie cognitive (Collins & Quillian, 1969). Nos études montrent aussi que les différents modes d'externalisation ont une efficacité différente en fonction des tâches et des individus. Les types d'informations externalisées et leurs modes d'externalisation dépendent des contraintes et des atouts des différents outils à disposition des concepteurs.

1.7. Prise de décision graphique en conception préliminaire

Nos trois études mettent aussi en lumière des modes de décision et de gestion de l'erreur différents en conception. Ils montrent surtout le rôle des représentations graphiques, et en particulier celui de l'esquisse numérique, dans ces processus.

En **conception individuelle**, la modalité graphique est un vecteur de simulation, par l'intermédiaire de l'esquisse conceptuelle, qu'elle soit numérique ou réelle. Le concepteur peut simuler librement l'objet architectural. La force de l'esquisse est que ce modèle peut être incomplet, incohérent, constitué d'une multitude de solutions. L'objectif est d'externaliser un maximum de possibilités et d'en évaluer la pertinence sur base d'une projection graphique. Lors de ce type d'activité de dessin, le concepteur peut commettre de nombreuses erreurs, qu'il peut ou non détecter, sur base des résultats de son action ou par anticipation, avant de dessiner. Il peut décider de récupérer ces erreurs ou remettre cette récupération à plus tard. En effet, dans le processus d'idéation, les erreurs font partie intégrante de la réflexion. Des solutions irréalistes et incohérentes peuvent exister sans problème alors que l'architecte simule sur papier la composition du bâtiment. La détection des erreurs ne semble pas être un point crucial dans ces activités de simulations.

Le dessin est aussi un vecteur de prise de décision par l'intermédiaire de la mise au net. La mise au net permet de transformer l'esquisse ambiguë en un objet architectural (temporairement) cohérent. Il s'agit donc d'éprouver le modèle mental du bâtiment à la réalité (mise à l'échelle et cohérence géométrique) et d'effectuer des détections d'erreurs basées sur le résultat. En effet, ces

moments de mise au net sont des moments d'évaluation explicite des solutions simulées. Parmi l'ensemble des solutions possibles, il s'agit d'en choisir une et de vérifier qu'elle convient dans le cours de la conception. Mais la détection des erreurs est favorisée par la diversification des points de vue sur l'objet architectural (Safin *et al.*, 2008a, 2008b). La présence d'un modèle 3D auto-généré renforce la caractère explicite de la détection des erreurs et de l'évaluation de la pertinence des solutions générées.

En **conception collaborative distribuée**, la prise de décision peut être organisée de plusieurs manières. Nous avons observé trois modes de prise de décision collective et de détection des erreurs.

- Dans le premier groupe, les générations de solutions et les activités de simulation prennent place individuellement. Les réunions de revue de projet ont pour objectif d'évaluer les différentes alternatives, de détecter d'éventuelles erreurs (détection collective basée sur le résultat) et de décider ensemble des solutions. En quelque sorte, on peut considérer que l'activité de simulation est individuelle et que la mise au net est collective.
- Dans le deuxième groupe, on observe un fonctionnement inverse : l'essentiel de l'activité de simulation prend place collectivement dans les réunions de revue de projet, éventuellement complétées de travaux de sous-groupes. Les idées sont émises, les résultats sont anticipés (détectations d'erreurs anticipative) et l'accord de chacun est requis. Cette étape constitue l'essentiel de l'activité de simulation. Ensuite, individuellement, les partenaires produisent les représentations basées sur les simulations collectives et mettent au net les décisions prises ensemble.
- Dans le troisième groupe, la simulation est individuelle. La prise de décision est aussi menée individuellement par les différents membres du groupe. Les réunions de revue de projet ne visent pas réellement à évaluer les décisions, mais plutôt à affirmer le bien fondé des choix préalables et à convaincre les partenaires. Il y a un cruel manque d'évaluation et de détection des erreurs, qui mène à un résultat plus faible. Les membres du groupe ne profitent en effet pas de la présence des partenaires pour élargir leur point de vue. Cela se ressent sur l'efficacité de la détection des erreurs⁸⁴.

Ces différents modes de fonctionnement abordent la détection des erreurs de manière variée et en tirant plus ou moins parti de la multiplication des points de vue offerte par le collectif.

Ainsi, on peut remarquer une correspondance entre des activités clairement identifiées dans la conception individuelle, à savoir la simulation et la prise de décision, et les modes de collaboration mis en place sur du moyen terme lors des réunions de revue de projet durant l'atelier.

1.8. L'utilisation des représentations externes graphiques en conception

La troisième étude de ce travail se place dans une perspective temporelle assez large (trois mois environ) et appréhende la construction d'un projet dans sa globalité (jusqu'à l'avant projet à tout le moins). Cette large vision nous permet de mieux comprendre les forces et faiblesses de chacun des types de représentations utilisés en conception. Nos observations ont montré que chaque média de représentation externe possède des atouts propres et des rôles différents dans la conception. Ils interviennent à des moments précis du projet, en fonction des besoins.

⁸⁴ A noter que les aspects socio-émotionnels liés au conflit freinent aussi peut-être la critique mutuelle constructive des productions des uns et des autres.

Tout d'abord, on observe un mouvement global d'accroissement de la précision et de la complexité des représentations externes et ce, quel que soit le média utilisé. Les rares modèles 3D des premières étapes sont sommaires et représentent des assemblages de volumes simples, alors que les derniers sont photoréalistes et mettent en scène le bâtiment avec une certaine finesse dans le rendu visuel. De même, les premiers plans DAO ne comprennent guère que du zonage et quelques traits, alors que les plans finaux sont bien plus élaborés et complets. Ce mouvement a déjà été décrit par Lebahar (1983), et accompagne la réduction de l'incertitude du modèle mental.

Les différentes représentations utilisées portent des fonctions distinctes.

- Les images (photos de références, vues aériennes, etc.) servent principalement voire exclusivement pour l'idéation. Il s'agit de communiquer ses intentions au groupe avec un substrat imagé. Dès que les concepts sont définis et intériorisés par tous, ces types de documents ont tendance à disparaître. Ces références externes utilisées massivement favorisent le raisonnement analogique (Leclercq & Heylighen, 2002 observent qu'environ la moitié des analogies sont provoquées par des références visuelles).
- Les croquis papier-crayon sont utilisés exclusivement en début de projet, quand le bâtiment peut encore être décrit avec des moyens rudimentaires. A mesure que la complexité du projet augmente, d'autres modes d'expression sont préférés par les concepteurs. A noter que des esquisses sont probablement encore dessinées plus tard à des fins de simulation, mais elles ne sont pas échangées entre les concepteurs. Ce qui veut dire que si ces esquisses existent dans des phases de travail individuel, elles ne sont pas porteuses, à ce stade, d'informations nécessaires pour la compréhension du projet par les partenaires.
- Les modèles 3D sont en revanche utilisés un peu plus tard dans le projet. Il semblerait que ces représentations ne soient pas idéales pour générer des solutions conceptuelles à un stade peu avancé. En revanche, ce type de modèle est utile pour représenter l'objet architectural dans les dernières étapes, avec plus de précision. A noter que l'usage des modeleurs 3D était une obligation pour les étudiants nancéiens, ce qui les a probablement invité à en construire plus que nécessaire. Ces observations montrent aussi que les concepteurs ne disposent pas de modeleurs simples d'utilisation (tels que DDDoolz, de Vries & Achten, 2002 ; ou EsQUIsE), pour outiller les toutes premières étapes de la conception, dans lesquelles nous n'observons pas de modèles 3D. Il faut aussi préciser que les modèles 3D ne se prêtent pas bien à une utilisation collective dans la version utilisée de SketSha⁸⁵. En effet, les utilisateurs du système ne peuvent manipuler que des images statiques des modèles (captures d'écran), ce qui rend difficile leur annotation, en témoigne le faible pourcentage de 3D annotées.
- Les outils de DAO sont utilisés de manière très polyvalente dans la durée de la conception. Les plans ainsi dessinés interviennent tout au long de l'atelier, sont les plus nombreux et sont annotés massivement lors des réunions de revue de projet à distance. Cette catégorie d'outils de production permet de composer des documents de nature assez différente, des schémas conceptuels aux plans d'exécution.
- Enfin, l'esquisse numérique était un outil supplémentaire proposé aux concepteurs dans notre étude. Nous pouvons remarquer que son utilisation en tant qu'outil de création de contenu (c'est-à-dire utilisé pour tracer de nouveaux dessins et non pour annoter des documents préexistants) est plutôt associée à une collaboration « forte ». En effet, seul le deuxième groupe utilise massivement l'esquisse numérique dans l'environnement de collaboration. Les autres groupes utilisent ce média surtout pour annoter des documents.

Il apparaît aussi que l'adaptation forte du type de représentations utilisées avec l'avancement du processus semble être caractéristique d'une collaboration et d'un processus de conception de qualité, tels qu'observés dans le deuxième groupe.

⁸⁵ La possibilité d'importer, de manipuler et d'annoter des modèles 3D dans SketSha est cependant en cours de développement.

Dans le chapitre 2, section 3.2, nous avons identifié sept dimensions permettant de caractériser les représentations externes en architecture. Nos observations permettent de mieux comprendre l'évolution de l'utilisation des représentations dans une perspective temporelle.

- Ainsi, sur la dimension « analogue ou symbolique », nous constatons que les représentations évoluent globalement vers un caractère analogue, c'est-à-dire figurant la réalité avec plus ou moins de fidélité. Aux représentations conceptuelles du début sont progressivement substituées des représentations précises formellement abouties de l'objet architectural.
- On retrouve le même mouvement global sur les dimensions « synthétique ou expressive » et « univoque ou ambiguë », les représentations évoluant vers des descriptions plus expressives et plus univoques du bâtiment.
- Les représentations sont partagées entre des versions émergives du bâtiment (vu de l'extérieur) ou immersives (avec un point de vue situé à l'intérieur). Seuls les modèles 3D permettent des vues immersives et l'utilisation d'une vue de l'intérieur dépend des objectifs, plus que du moment : les points de vue immersifs sont minoritaires et interviennent surtout pour des questions spécifiques relatives à l'ambiance intérieure, à la lumière ou à l'intégration des technologies par exemple.
- Si les représentations 2D sont utilisées tout au long du processus, les modèles 3D, eux, n'interviennent qu'après quelques semaines (*cf. supra*).
- La dimension la plus intéressante est sans doute liée au degré d'interactivité des représentations. En effet, alors que tous les plans et modèles échangés sont *a priori* d'ordre contemplatif, les annotations numériques et les outils de manipulation permettent de leur adjoindre un caractère interactif. Cependant, ce mode d'interactivité se prête mieux aux plans qu'aux images de modèles 3D. Ces derniers sont en effet peu annotés, comparativement aux plans DAO.
- Enfin, concernant la dimension « visuelle ou multimodale », nous observons que toutes les représentations sont exclusivement visuelles, car les étudiants ne disposent pas des ressources nécessaires pour créer et utiliser des représentations plus riches (films, réalité virtuelle, etc.).

1.9. Modèle de la conception préliminaire en architecture

Les différentes constatations évoquées ci-dessus nous amènent à revoir le schéma décrivant les étapes du projet architectural, que nous proposons en introduction à ce travail (figure 98).

Le schéma initial présentait une phase créative dissociée d'une phase de design préliminaire, dans la conception. Au vu de nos observations dans l'atelier de collaboration, portant jusqu'au projet initial, nous pouvons affirmer que ce lien est moins linéaire. Nous avons en effet observé que le design préliminaire n'était pas distinctement dissocié de la phase créative : des retours sur le concept sont possibles, notamment suite à des *feedbacks* de personnes extérieures. Après les réunions avec les encadrants et la présentation intermédiaire des résultats, deux des trois groupes repartent en phase d'idéation pour prendre en compte les remarques effectuées.

Deuxièmement, il s'avère que les différents types de représentations sont créés tout au long du processus, sans que les outils utilisés soient strictement liés à une étape. Si le croquis papier-crayon et les images (photos, références, etc.) sont exclusivement utilisés lors de la phase créative, il n'en est pas de même pour les modèles visuels et les plans DAO. Les modèles 3D ne sont pas utilisés en tout début de processus, mais prennent rapidement un rôle important. Les plans DAO en revanche sont tracés tout le long de la conception. Ces modèles et plans évoluent cependant vers plus d'expressivité et d'univocité à mesure que la conception approche du projet initial.

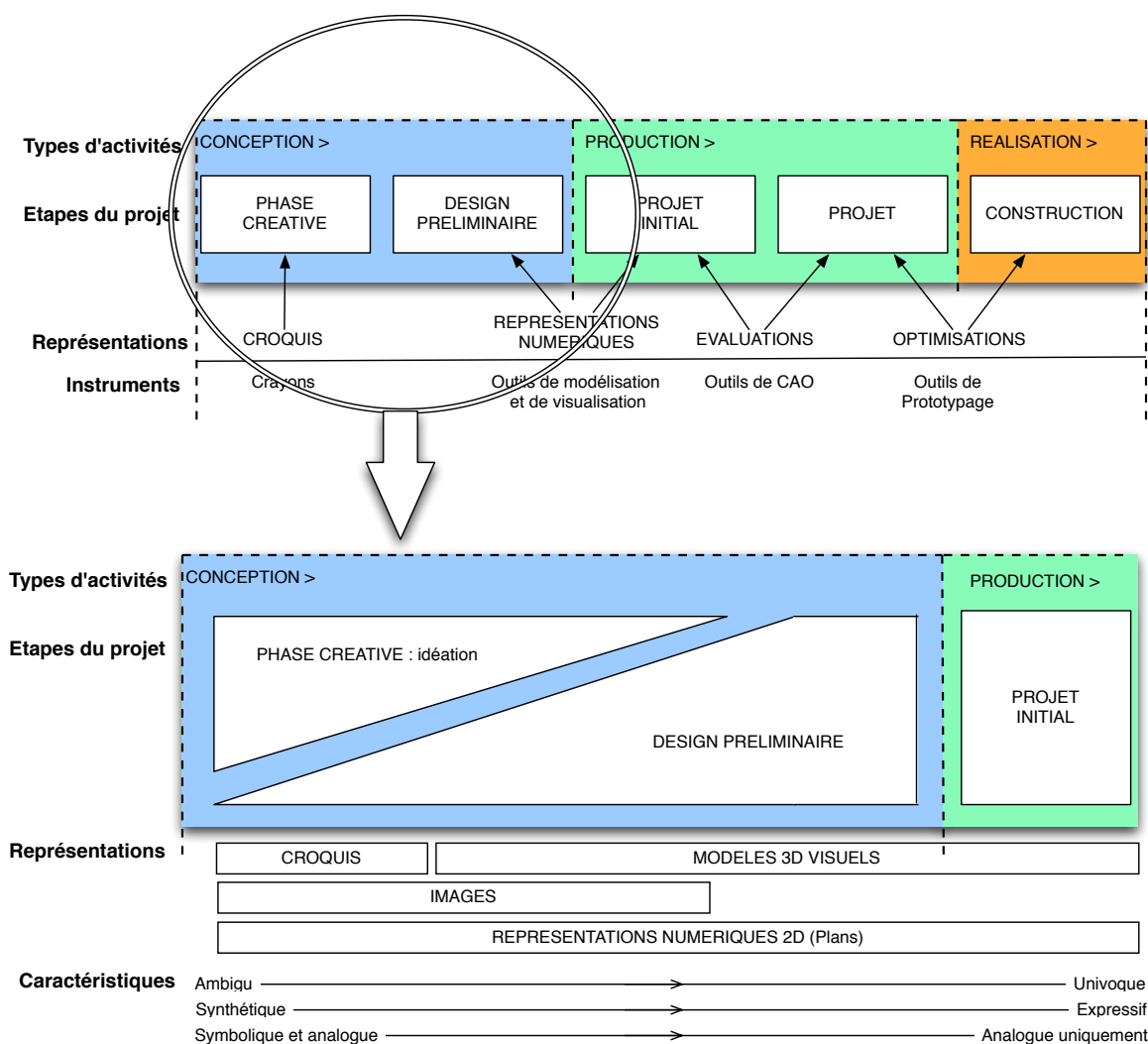


Figure 98
 Etapes du projet de conception architecturale, version initiale en haut et version actualisée en bas.

1.10. L'esquisse numérique comme mode de représentation particulier

Les modèles de la cognition dite externe identifient quatre rôles des représentations externes en support aux activités cognitives : alléger la charge mentale, structurer le comportement, étendre la cognition et matérialiser l'information. Dans cette section, nous envisageons les fonctions spécifiques de l'esquisse numérique en regard de ces quatre rôles. Comme évoqué dans notre introduction théorique, les différents modes d'externalisation varient en efficacité, en fonction de l'activité. Nous tentons d'identifier ici les points forts et les faiblesses de l'esquisse numérique en soutien à la conception préliminaire, relativement à ces quatre rôles.

Alléger la charge mentale. Les représentations externes permettent d'alléger la charge mentale en fournissant une aide mnémotique et en permettant un traitement perceptif, parfois plus efficace que le traitement cognitif (Zhang & Norman, 1994 ; Cox, 1999 ; Zhang, 2000). Toutes les représentations en architecture permettent évidemment de jouer le rôle de « prothèse mnémotique ». Mais l'esquisse papier-crayon possède des avantages bien connus sur le plan cognitif : elle permet notamment de soutenir la simulation de nombreuses solutions, ce qui est

difficile à faire uniquement mentalement, compte tenu de la complexité des problèmes (Bilda *et al.* 2006, Bilda & Gero, 2008). Cette facilité de simulation est supportée par l'immédiateté et la souplesse de l'externalisation par le dessin d'esquisses. Dessiner avec un crayon est un acte simple et naturel, en particulier pour les architectes formés pour ce faire. Il n'est surtout pas nécessaire de disposer d'un modèle cohérent ou complet pour pouvoir l'externaliser sous forme d'esquisse.

L'esquisse numérique souscrit en partie aux qualités de l'esquisse papier, mais est néanmoins moins efficace que cette dernière dans l'allègement de la charge mentale. En effet, l'esquisse numérique est plus compliquée à produire compte tenu des limitations décrites ci-avant (faible résolution, taille du dessin et manque de diversité des traits). Dès lors, si elle ne procure pas de plus-value directe, elle tend à disparaître. Les bénéfices attendus en termes d'immédiateté de l'esquisse sont donc en partie perdus. En outre, lorsque le dessin numérique est interprété, il est nécessaire d'externaliser entièrement le modèle du bâtiment afin de pouvoir profiter d'une 3D auto-générée, ce qui le rend moins souple que son équivalent papier. Pour garder la souplesse de l'esquisse, les concepteurs séparent leurs esquisses conceptuelles de leurs croquis synthétiques. A noter que ces contraintes n'impliquent pas nécessairement une augmentation de la charge mentale des concepteurs. Elles peuvent aussi agir en limitant l'étendue des possibilités d'action et de réflexion, les activités de simulations graphiques étant réduites.

Structurer le comportement. Les représentations externes permettent de structurer voire déterminer le comportement et d'induire des stratégies pour résoudre les tâches (Zhang, 2000). L'esquisse traditionnelle sur papier induit des comportements de réinterprétation et l'émergence de découvertes inattendues.

Une des observations les plus frappantes de notre étude est liée à la structuration du comportement par les contraintes de l'esquisse numérique, l'interprétation du dessin et les retours de cette interprétation. Les limites du système restreignent les possibilités d'externalisation et certains types de productions graphiques ne prennent pas place dans l'environnement numérique dans les situations observées. Nous avons aussi clairement montré que la présence d'une interprétation modifiait radicalement les stratégies de conception, l'organisation de l'activité et la nature des productions graphiques. Nous ne pouvons cependant pas statuer sur le caractère positif ou négatif de ces influences.

En conception collaborative, en revanche, il ne semble pas que l'esquisse numérique induise un comportement particulier. La modalité graphique est utilisée de manière polyvalente pour répondre aux besoins communicationnels du groupe et en support aux modes de travail collaboratif mis en place par les étudiants.

Étendre la cognition. Comme évoqué ci-dessus, il est difficile de statuer sur l'aspect bénéfique ou néfaste des influences du média numérique sur l'activité graphique et l'activité de conception. Nous observons cependant que le modèle 3D constitue une ressource pour l'action des étudiants et pouvons supposer qu'il apporte une réelle plus-value pour l'activité cognitive, sans toutefois que nous l'ayons mesurée précisément.

Du point de vue collectif, nous pouvons cependant affirmer que l'utilisation de la modalité graphique permet d'étendre la cognition collective. L'esquisse numérique supporte les différentes activités nécessaires à la conception collaborative et permet d'étendre les possibilités d'action et de réflexion collectives. Les comportements d'annotation observés permettent de désambiguïser le discours, de mettre en correspondance des éléments de documents différents, de supplanter la modalité gestuelle par des annotations déictiques.

Matérialiser l'information. Un des avantages les plus importants de l'externalisation de la pensée est lié à la matérialisation de l'information. En traçant un dessin, celui-ci devient un objet du monde, soumis à des lois physiques et géométriques. Matérialiser une information spatiale, c'est la confronter au réel. L'interprétation du croquis renforce cette confrontation. En effet, en plus de la vérification de la cohérence rendue possible par l'approche géométrique du dessin, la construction d'un modèle 3D va auto-éprouver les représentations externes du bâtiment.

En conception collaborative, l'esquisse numérique porte un rapport paradoxal à cette matérialisation. Les annotations numériques peuvent être utilisées comme un outil d'édition de documents. Bien qu'elles soient virtuelles, ces productions graphiques sont destinées à perdurer et à devenir un objet du monde, tout comme des annotations au stylo sur papier. Mais la modalité graphique peut aussi être utilisée pour interagir avec un espace éphémère de travail. La matérialisation a ici moins de sens pour son auteur : les annotations et dessins ont pour vocation d'être éphémères et de n'exister que dans l'ici et maintenant de la communication virtuelle.

En plus de ces différents rôles cognitifs portés par l'esquisse numérique, notre étude montre aussi les contraintes que ce média induit sur les processus d'externalisation. Plusieurs modes de dessin à main levée sont possibles en conception, de l'esquisse conceptuelle à l'esquisse synthétique, et le choix du mode de dessin repose sur un principe d'évaluation des coûts et des bénéfices, fonction des objectifs, de l'avancement du processus et des contraintes de l'outil. L'externalisation ne prend place que quand nécessaire, en fonction de ce rapport coût-bénéfice.

1.11. Recommandations pour la conception de dispositifs d'esquisse numérique

Ce travail d'ergonomie permet aussi de proposer des pistes et des recommandations pour l'interaction à base d'esquisse numérique. Compte tenu de nos observations, analyses et interprétations, nous pouvons en effet formuler plusieurs pistes pour rendre les dispositifs d'esquisse numérique plus pertinents et plus adaptés à la pratique des utilisateurs. Nous n'abordons pas ici les améliorations propres aux dispositifs développés par le LUCID (EsQUiSE, SketSha et le Bureau Virtuel), mais nous proposons des recommandations plus générales.

Nous pouvons noter que les questions d'usage principales soulevées par les dispositifs d'esquisse numérique que nous avons identifiées dans la littérature sont aussi criants dans le cas de nos études. L'impact de l'interprétation d'esquisse est en effet une problématique compliquée. Fournir des retours d'interprétation (systèmes critiques, 3D auto-générée..., etc.) nous semble une voie prometteuse pour soutenir la conception, mais pose de nombreuses difficultés : coût associé au dessin, rôle structurant ou perturbateur du retour d'interprétation dans l'activité, qualité et finesse de l'interprétation et utilité de ce retour. Cette dernière question est probablement la plus importante, car rarement posée dans la littérature.

Tout d'abord, les dispositifs d'esquisse doivent permettre une grande liberté de l'expression graphique. L'esquisse conceptuelle, rapide, incomplète, floue, ambiguë, équivoque, doit pouvoir être utilisée dans les environnements numériques, sous peine de provoquer le rejet de la technologie par les utilisateurs. Plusieurs pistes permettent selon nous de concilier les deux types de dessins, conceptuel et synthétique. Une première consiste à offrir différents outils numériques aux concepteurs : certains permettant une expression libre et non interprétée, d'autres visant explicitement l'interprétation. L'utilisation de surligneurs pour identifier les éléments à interpréter nous semble par exemple une voie porteuse. Même si l'adjonction d'outils spécifiques peut entrer

en contradiction avec la philosophie des dispositifs, qui vise à garder le caractère spontané du dessin, cette option nous paraît cependant pertinente pour deux raisons. D'une part, l'activité d'explicitation du dessin existe naturellement dans la conception, par l'intermédiaire de la mise au net. Celle-ci intervient régulièrement et est déjà dissociée de la génération de solutions « en roue libre ». Elle utilise souvent des outils spécifiques tels que des surligneurs. Proposer de tels outils ne devrait donc pas introduire de rupture gênante pour l'activité. D'autre part, il semble que les utilisateurs ne souhaitent pas que leur activité soit « surveillée » par un logiciel sans qu'ils en soient informés. Nos études ont montré qu'ils « cachent » l'interprétation de leurs dessins conceptuels au logiciel. Proposer des outils spécifiques consiste donc à rendre la main à l'utilisateur pour conduire le dialogue qu'il peut entretenir avec le logiciel.

Une deuxième façon de laisser coexister les dessins synthétiques et dessins conceptuels est d'ouvrir les environnements à d'autres modes de productions graphiques. L'interprétation de croquis pourrait se faire sur base d'esquisses papier scannées. Elle pourrait aussi se faire en surlignant des documents importés. Dans ce cas, il nous apparaît nécessaire de veiller à ce que les imports soient simples à réaliser et que les environnements soient ouverts.

Une deuxième recommandation concerne l'interaction des concepteurs avec les interprétations des esquisses. Les modalités du retour d'interprétation sont rarement envisagées dans la littérature. Or il apparaît essentiel de définir des stratégies de dialogue entre le concepteur, les modules d'interprétation et les *feedbacks* apportés par le logiciel. Nos observations ont montré le caractère structurant de l'interprétation, plus encore quand le modèle créé est affiché en permanence. Sans que nous ne puissions donner de règles précises, il apparaît nécessaire de positionner clairement les modalités du dialogue au cœur de la conception du système. L'interprétation des esquisses crée un certain nombre de règles pour son élaboration, qu'il convient d'identifier, d'explicitier et dont il faut anticiper les impacts. De même, l'interprétation d'esquisse ne peut pas se faire, de notre point de vue, sans une interaction avec le concepteur. L'esquisse est par définition ambiguë et imprécise (y compris l'esquisse synthétique) et son interprétation, même avec des moteurs de reconnaissance avancés, implique des activités de supervision de la reconnaissance du système par l'utilisateur. Nos travaux sur le projet ICC ont montré qu'il est nécessaire d'anticiper ces changements d'activités sous peine aussi de porter préjudice à l'utilisabilité des logiciels (Safin *et al.*, 2008).

En ce qui concerne la conception collaborative, il serait intéressant d'offrir des outils permettant de concilier l'approche « édition de documents » et l'approche « espace de travail ». La modalité graphique est proposée ici de manière polyvalente et nous observons qu'un type de démarche semble prendre le pas sur un autre en fonction des individus et des groupes. Or, les deux types sont utiles, voire nécessaires à l'activité collaborative. Plusieurs solutions sont possibles pour ce faire : proposer des astuces logicielles (annotations éphémères, trace temporaire du déplacement du pointeur, etc.) ou des outils spécifiques comme des interfaces gestuelles ou tangibles pour prendre en charge les fonctions déictiques des annotations.

Aussi, pour tirer pleinement profit de la modalité graphique dans la collaboration, il est nécessaire d'ouvrir l'environnement de collaboration à de nombreux formats de fichier en entrée comme en sortie. La manipulation et l'annotation de modèles 3D, la recherche collaborative d'images sur Internet et la possibilité d'importer spontanément des productions papier sont des évolutions souhaitables des dispositifs de dessin collaboratif. Il apparaît en effet que l'annotation de documents préétablis est la principale activité menée à l'aide de la modalité graphique. Elle est donc à privilégier.

Enfin, nous avons montré que le dessin numérique possède des contraintes et un coût intrinsèque, et qu'il est utilisé en relation avec les augmentations qu'il peut apporter à l'activité. Ce constat nous amène à deux recommandations importantes, même si elles peuvent paraître triviales. D'une part,

il est nécessaire d'évaluer le coût de l'interaction graphique et de le réduire au maximum. Le postulat implicite classiquement utilisé dans le développement d'environnements de nouvelle génération est que la mise à disposition d'outils d'interactions prétendus simples ou naturels rend automatiquement la tâche simple (Norman, 2010). Ce postulat doit être remis en question : l'interaction au stylo est intrinsèquement porteuse de contraintes. Identifier et réduire ces limitations et contraintes est une étape nécessaire à l'adoption de ce type de technologie. Citons, entre autres, la résolution du dessin, le calibrage, la variété des traits, la nuance dans le dessin, etc.

D'autre part, il est nécessaire de questionner l'utilité des augmentations proposées. De nouveau, les bénéfices escomptés sont souvent posés d'emblée et les tests utilisateurs ne remettent jamais en question la pertinence des augmentations proposées. Dans nos études, nous n'avons pas de garanties quant à l'utilité du modèle 3D. S'il semble intéressant pour les étudiants, nos observations informelles dans des cadres professionnels et une étude formelle (Mayeur *et al.* 2007a, 2007b) nous font penser qu'il a peu de pertinence dans une pratique professionnelle. En revanche, les augmentations apportées par le partage de croquis en temps réel sont bel et bien utiles pour les concepteurs, en témoignent la tenue d'un atelier collaboratif pour la cinquième année consécutive dans un cadre pédagogique (voir Safin *et al.*, 2011) et les nombreux retours enthousiastes parvenus lors d'études menées dans des cadres professionnels (Safin & Leclercq, 2009, Defays *et al.*, *in press*). Cette pertinence est conditionnée par la transmission des traits en temps réel et la possibilité d'importer, de manipuler et d'annoter des documents. Il nous semble important de positionner la question de l'utilité des dispositifs au centre des préoccupations de développement, c'est-à-dire d'adopter une approche anthropocentrée (Rabardel, 1995).

1.12. Critique de ce travail

Sans revenir sur les critiques des méthodes abordées dans les chapitres spécifiques des études, nous pouvons faire trois remarques globales à propos de notre travail.

Premièrement, la méthode utilisée, l'analyse de protocoles, présente un certain nombre de limites. Le faible nombre de participants, leur profil particulier et les caractéristiques uniques des expériences mises en place et de leurs énoncés rendent caduque toute tentative de généralisation de nos résultats ou de description par la preuve. Cette faiblesse constitue probablement également la qualité de ce travail : en corollaire, les analyses et observations sont approfondies, et ne sont pas restreintes à l'utilisation d'instruments de mesure, par essence réducteurs, ou à l'observation exclusive de critères pré-établis. Il ne s'agit donc pas de généraliser nos observations mais bien de comprendre en profondeur la mécanique cognitive des interactions entre des concepteurs et leurs dessins dans des environnements numériques. Nous pensons néanmoins que la complexité du domaine dans lequel s'inscrit ce travail justifie l'utilisation de ce type de méthode. En outre, le manque de connaissances de la communauté scientifique sur l'impact cognitif de l'esquisse numérique nécessite selon nous d'aborder la question sous un angle descriptif, en adoptant une approche fortement ancrée dans un contexte d'activité spécifique, à savoir ici la conception architecturale. Nos prochains travaux devront vérifier nos observations et étendre nos réflexions à d'autres domaines.

Une deuxième critique que nous pouvons faire par rapport à ce travail est le manque d'implication des participants dans l'analyse de leur activité. Nous n'avons en effet pas pu mener d'entretiens systématiques ni d'auto-confrontations, qui auraient pu nous éclairer sur les activités cognitives des concepteurs. Cet état de fait est dû aux conditions dans lesquelles s'est effectué ce travail. Nous avons saisi des opportunités de prise de données ne nous laissant pas toujours une marge de liberté complète pour structurer nos démarches expérimentales, et les analyses ont été effectuées parfois plusieurs mois après les enregistrements vidéo, rendant la mise en place

d'entretiens impossible. Nous avons néanmoins tenté de contourner cette limitation par l'utilisation de nombreuses données subjectives complémentaires bien que peu formalisées⁸⁶, par des contacts informels avec les étudiants de l'atelier collaboratif et surtout par l'analyse conjointe de toutes les activités avec un architecte. En effet, toutes nos observations ont été conduites sous un mode multidisciplinaire, en combinant le regard d'un ergonome, maîtrisant les aspects méthodologiques et la rigueur de l'observation, avec celui d'un architecte (enseignant-chercheur en méthodologie de projet), maîtrisant la sémantique architecturale, les outils utilisés et connaissant bien les problématiques de la conception. Cette approche multidisciplinaire peut en partie compenser le manque de données subjectives de la part des utilisateurs quant à leur processus de conception.

En outre, il faut aussi souligner le contexte particulier de la conception architecturale : les réflexions que nous avons menées dans ce travail sur le dessin et l'esquisse numérique portent sur des publics formés et habitués à dessiner. Il n'est dès lors par certain que nos conclusions puissent revêtir un caractère universel. Néanmoins, nous avons observé des pratiques comparables dans d'autres domaines. Dans le domaine de la conception mécanique par exemple, le dessin prend une place bien moins importante et les outils de CAO et DAO sont utilisés dès les premières étapes. Mais la pratique d'annotation est relativement comparable à celle observée dans le domaine de l'architecture (avec probablement moins d'annotations figuratives et plus d'annotations textuelles). Dans le domaine médical, et en particulier celui de l'enseignement de l'anatomie, l'esquisse numérique s'avère aussi être un instrument utile, pour son caractère interactif, immédiat et partageable. Dès lors, si cette étude a spécifiquement pris en compte cette activité particulière qu'est la conception architecturale, nous pensons que plusieurs de nos conclusions, et à tout le moins les principes généraux d'interfaces-esquisses que nous avons énoncés, peuvent être transposables à ces autres domaines où le dessin n'est pas une pratique courante, mais un enjeu en devenir.

1.13. Perspectives

Ce travail de doctorat entendait répondre à certaines questions relatives aux modes d'externalisation graphique dans les activités complexes et capitaliser des connaissances sur l'usage de l'esquisse numérique, sur la conception architecturale et sur le rôle de la modalité graphique dans la conception distante. Il ouvre surtout la voie à de nombreux questionnements complémentaires.

Evidemment, notre objectif est de pouvoir continuer nos recherches sur l'esquisse numérique dans un milieu professionnel. De notre point de vue, et surtout compte tenu de l'enthousiasme que suscite le Studio Digital Collaboratif dans les milieux professionnels que nous côtoyons, l'avenir de nos questionnements portera plutôt sur les aspects collaboratifs. Certains de nos projets ont déjà commencé à tester le logiciel dans des contextes professionnels, bien plus contraints que les

⁸⁶ Toutes les données ont en effet été recueillies dans le cadre de travaux pratiques d'étudiants en quatrième ou cinquième année d'ingénieur-architecte. Dans le cadre de ces travaux pratiques, les étudiants étaient invités à poser un regard critique sur leur activité. Pour la conception individuelle, les étudiants s'observaient mutuellement en groupes, analysaient l'activité de conception avec le concepteur et présentaient leurs conclusions oralement et par écrit. Pour l'atelier collectif, chaque groupe était tenu lors de l'évaluation finale de présenter en détail son projet ainsi que le déroulement de la collaboration de leur point de vue. Ces différentes données étant plus ou moins proches de nos questions de recherche, nous ne les avons pas exploitées de façon systématique. Elles ont néanmoins guidé nos analyses et nos interprétations.

contextes pédagogiques. Le projet ANR CoCréA⁸⁷ investigate spécifiquement les questions d'usage des technologies collaboratives dans les agences d'architecture. Il a ainsi permis de tester l'utilisation du SDC dans un contexte réel, ainsi que dans des contextes expérimentaux mobilisant des architectes professionnels.

Comme décrit plus haut, la force de ce travail est aussi sa faiblesse : les conditions particulières d'expérimentation et de recueil de données, bien qu'elles permettent d'approcher en profondeur les questions posées dans ce travail, restent particulières et rendent toute généralisation difficile. Il serait dès lors intéressant de reposer les mêmes questions et de les aborder avec des approches plus systématiques. Ainsi, le rôle de l'esquisse numérique en conception collaborative pourrait être envisagé par une approche de laboratoire, en complément à notre approche *in situ*. Varier de manière systématique les conditions de communication et adopter des démarches comparatives nous permettrait d'identifier plus clairement les rôles remplis par l'esquisse numérique et les rapports qu'elle entretient dans d'autres modalités d'échanges. Une thèse de doctorat sur le rôle de la modalité graphique en collaboration multimodale distante, à l'encadrement de laquelle nous participons, est actuellement en cours à l'Université de Liège⁸⁸.

Ce travail a déjà permis de proposer un certain nombre de pistes pour améliorer les environnements que nous avons utilisés. Nous espérons qu'il aura permis et permettra encore de faire évoluer les logiciels développés au LUCID. Nous continuerons à alimenter ces réflexions dans une visée pratique, qui est essentielle à nos yeux.

Enfin, nous avons pour objectif de sortir les réflexions sur l'esquisse numérique du cadre strict de la conception architecturale. En effet, il est apparu durant ce travail qu'en collaboration distante, la notion d'esquisse numérique était moins importante que la notion plus générique de modalité graphique. Les dessins en tant que tels sont quantitativement moins importants que les annotations de documents préexistants. Or, la pratique d'annotation est relativement universelle. Nos prochains travaux viseront donc à investiguer les questions de ce travail dans d'autres domaines, notamment en médecine. Le projet ARC COMMON⁸⁹ auquel nous participons vise entre autres à investiguer le rôle de la modalité graphique pour la communication dans d'autres types d'activités complexes, telles que le diagnostic médical.

⁸⁷ Pratiques collaboratives en conception architecturale. Financement ANR - Agence nationale de la recherche (France). Programme thématique « Création : acteurs, objets, contextes » 2008-2011 - Réf ANR 08 CREA-030-02. Partenariat : LIMSI-CNRS (Université Paris Sud Orsay), LUCID-ULg (Université de Liège), ARIAM-LAREA (ENSA Paris-la-Villette).

⁸⁸ Aurore Defays, thèse en psychologie (laboratoire LECIT) financée par une bourse de doctorat non-FRIA 2010-2014, Conseil de la recherche de l'Université de Liège, dans le cadre du projet ARC COMMON.

⁸⁹ Collaboration médiatisée multimodale naturelle - Programme Actions de recherche concertées 2011-2014 (Communauté française de Belgique - Académie Universitaire Wallonie-Europe) associant cinq laboratoires de l'université de Liège : Le LUCID-ULg (Faculté des Sciences Appliquées), le LECIT (Faculté de Psychologie), Unité de Rhétorique et Sémiotique (Faculté de Philosophie et Lettres), Faculté de Médecine et Faculté d'Architecture

2. Epilogue

Depuis longtemps déjà, nous portons un vif intérêt personnel aux questions liées à l'utilisation des technologies, des outils et des représentations dans les activités humaines. Témoin d'une époque où les évolutions technologiques sont plus rapides et bouleversantes que jamais, les questions liées à notre rapport à l'information et aux technologies, qu'elles soient des gadgets ou des révolutions, et à la manière dont celles-ci nous façonnent comme nous les façonnons, ont quelque chose de captivant. A ce titre, l'explosion des nouvelles formes d'interaction, tactile, vocale, gestuelle, multimodale ou encore graphique comme ici, nécessite que soient posées les questions liées à leur usage pour mieux comprendre notre façon d'interagir avec nos outils. Après plusieurs projets de recherche et développement à visées principalement appliquées, nous avons décidé de nous lancer corps et âme dans cette problématique, par le biais de ce travail de thèse. A l'heure où celui-ci se clôture, nous regardons en arrière avec un mélange de fierté, de regret et de nostalgie.

Fierté d'abord, car ce travail - et c'est probablement l'essence même d'un travail de thèse - fut une épreuve difficile. Le contexte de ce doctorat fut particulier : sans financement propre à cette série d'études, nous avons dû tirer profit des opportunités qui se sont présentées à nous pour étudier de près cette activité passionnante qu'est le dessin d'architecte. Nous pouvons regarder le travail accompli avec satisfaction : nous avons posé de nombreuses questions, mis en place des méthodologies originales et espérons avoir pu alimenter, modestement, les domaines de l'interaction homme-machine, de la psychologie cognitive et du *design cognition*. Nous avons tenté, tout au long de notre réflexion, de mieux cerner l'utilisation des représentations externes en architecture et, principalement, celle de l'esquisse numérique à main levée, qui représente selon nous une opportunité pertinente, voire une voie d'avenir, pour soutenir les activités impliquées dans la conception. Nos observations, nous l'espérons, permettront aussi de mieux comprendre quel impact un support d'externalisation peut exercer sur l'activité cognitive de ses utilisateurs.

Parallèlement à ces questions d'ordre fondamental, nous avons également la conviction que les efforts que nous avons déployés dans nos analyses ont en tout cas permis de marquer la conception et le développement des logiciels sur lesquels nous avons œuvré.

Regret ensuite, car au terme d'un travail d'une telle ampleur, on souhaiterait évidemment recommencer pour mieux faire : mieux positionner nos questions de recherche, mieux maîtriser les observations et expérimentations, mieux gérer le séquençage de nos activités et mieux approfondir nos questionnements et les réponses que nous leur apportons. Ces regrets, nous tâcherons de les transformer en opportunités, car nous considérons cette thèse comme un commencement plus que comme un aboutissement. Nous avons la ferme intention de poursuivre nos approches et les étendre, fort des nombreux apprentissages que nous avons réalisés.

Nostalgie enfin, car si difficile qu'il soit, ce doctorat fut avant tout une aventure extraordinaire, dont nous garderons un souvenir impérissable. Une aventure dans le domaine de l'innovation : inscrire un travail de recherche au cœur du développement d'outils de future génération constitue assurément une satisfaction personnelle. Le milieu stimulant du laboratoire LUCID nous a permis d'étudier les questions qui nous animent au travers de l'utilisation de trois environnements technologiques innovants : le Bureau Virtuel et les logiciels EsQUIsE et SketSha. Nous avons aussi eu la chance d'observer un atelier de conception architecturale unique en son genre et de côtoyer le développement d'autres projets de recherche tout aussi ambitieux. Toucher de près l'innovation et y apporter une modeste contribution nous a permis de réfléchir à la place que peut occuper l'ergonome au sein d'un processus d'innovation : il doit selon nous poser les bonnes questions, s'offrir les moyens d'y répondre et accompagner le processus en portant la dimension humaine, tout en restant, malgré tout, au service de la « vision ».

Mais l'aventure fut avant tout humaine : ce qui fut probablement le plus enrichissant dans cette entreprise réside dans la chance que nous avons eu de travailler en équipe. Bien que ce document soit une œuvre personnelle, elle repose sur une collaboration stimulante de plusieurs années dans une équipe multidisciplinaire dynamique de recherche. Pendant tout notre parcours, et au cours des nombreux projets auxquels nous avons participé - ceux relatés ici mais bien d'autres aussi - nous avons confronté nos idées à celles de nos collègues développeurs, ingénieurs, concepteurs, graphistes ou architectes, nous enrichissant tous mutuellement. Nous avons beaucoup appris à leur contact et espérons vivement que cet apprentissage fut réciproque. Nous pensons que cette multidisciplinarité est une condition indispensable à un travail de recherche et de développement de qualité. Encore une fois, nous remercions toute l'équipe !

Pour conclure, nous espérons que ce doctorat pourra alimenter les réflexions des chercheurs dans le domaine de la cognition externe, inspirer les développeurs d'applications dans le domaine des interfaces-esquisses et apporter une contribution significative à l'étude des processus cognitifs de conception.

Notre plus cher souhait est que le lecteur puisse prendre autant de plaisir à lire ce travail que nous en avons eu à l'écrire...

3. Bibliographie

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33, 131-152.
- Akin, Ö. (2001). Variants and Invariants of Design Cognition. In C. Eastman, M. McCracken & W. Newstetter (Eds.), *Design knowing and learning: Cognition in design education* (pp. 105-124). Amsterdam: Elsevier.
- Akin, Ö., & Akin, C. (1998). On the process of creativity in puzzles, inventions, and designs. *Automation in Construction*, 7, 123-138.
- Alexander, C. (1971). *De la synthèse de la forme*. Paris : Dunod
- Aliakseyeu, D., Martens, J. B., & Rauterberg, M. (2006). A computer support tool for the early stages of architectural design. *Interacting with Computers*, 18(4), 528-555.
- Ango-Obiang, M. F. (2007). *Le travail collaboratif dans le cadre d'un projet architectural*. Paper presented at the 1ère Journée de l'Atelier Innovation et Tradition de l'Association Internationale Management Stratégique.
- Baddeley, A. (1992). Working Memory. *Sciences*, 255, 556-559.
- Ball, L., Maskill, L. & Ormerod, T. (1997). Satisficing in engineering design: Causes, consequences and implications for design support. *Automation in Construction*, 236.
- Basile, M., & Terrin, J.-J. (2007). *IP City : la réalité mixte au service du projet urbain*. Paper presented at the SCAN'07 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique.
- Bastien, C., & Scapin, D. (1993). *Critères ergonomiques pour l'évaluation des interfaces utilisateurs*. Rapport RT n°158, INRIA.
- Bauer, M. I. & Johnson-Laird, P. N. (1993). How diagrams can improve reasoning. *Psychological Science*, 4, 372-378.
- Beers, P., Boshuizen, H., Kirschner, P., & Gijsselaers, W. (2006). Common ground, complex problems and decision making. *Group Decision and Negotiation*, 15, 529-556.
- Bilda, Z., & Demirkan, H. (2003). An insight on designers' sketching activities in traditional versus digital media. *Design studies*, 24, 27-50.
- Bilda, Z., & Gero, J. (2007). The impact of working memory limitations on the design process during conceptualization. *Design Studies*, 28.
- Bilda, Z., & Gero, J. (2008). *Idea development can occur using imagery only*. Paper presented at the Design Computing and Cognition'08.
- Bilda, Z., Gero, J., & Purcell, A. (2006). To sketch or not to sketch? That is the question. *Design Studies*, 27, 587-613.
- Billon, A., Safin, S., Defays, A., Decaestecker, C., & Warzée, N. (2010). *Effet de la modalité visuelle sur le jugement de la réverbération d'une salle*. Paper presented at the 10ème Congrès Français d'Acoustique.
- Blavier, A. (2006). *Impact des images en 2D ou 3D sur les processus cognitifs impliqués dans le traitement visuel et dans le contrôle de l'action : le cas de la chirurgie minimale invasive*. PhD Thesis, University of Liège

- Blavier, A., & Nyssen, A.-S. (2010). Étude de l'impact des nouvelles technologies sur les modes de coopération des chirurgiens par l'analyse des communications sur le terrain. *Le Travail Humain*, 73(2).
- Boden, M. (1990). *The Creative Mind : Myths and Mechanisms*. London : Weidenfeld & Nicolson.
- Bonnardel, N. (1999). L'évaluation réflexive dans la dynamique de l'activité du concepteur. In J. Perrin (Ed.), *Pilotage et évaluation du processus de conception* (pp. 87-105). Paris: L'harmattan.
- Bonnardel, N. (2000). Towards understanding and supporting creativity in design: analogies in a constrained cognitive environment. *Knowledge-Based Systems*, 13, 505-513.
- Bonnardel, N. (2009). Activités de conception et créativité: de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives. *Le Travail Humain*, 72(1), 5-22.
- Bonnardel, N., & Sumner, T. (1996). Supporting evaluation in design. *Acta Psychologica*, 91(3), 221-244.
- Boujut, J.-F. (2010). Workshop Proceedings of 9th International Conference on the Design of Cooperative Systems. Improving shared representations by linking discursive and graphical aspects of design. *International reports on socio-informatics*, 7(1).
- Boujut, J.-F., & Blanco, E. (2003). Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12(2), 205-219.
- Boujut, J.-F., Darses, F., & Guibert, S. (2006). Etude des annotations en situation collaborative de conception mécanique. In P. Salembier & M. Zacklad (Eds.), *Annotation dans les documents pour l'action*. Paris: Lavoisier.
- Boulanger, C., Decortis, F., & Leclercq, P. (2006). Annotations et architecture. In P. Salembier & M. Zacklad (Eds.), *Annotations dans les Documents pour l'Action* (pp. 109-126). Paris: Lavoisier.
- Boulanger, C. Decortis, F. & Safin, S. (2005). Portable Tool for Finalizing Freehand Drawings : Activity Analysis and Design Requirements. *Proceedings of EACE 2005 : Annual Conference of the European association of Cognitive Ergonomics*. Greece, September
- Boulanger, C., Safin, S., & Leclercq, P. (2005). *Le papier dans les environnements virtuels pour l'architecture : Quels supports pour un traitement digital de l'information?* Paper presented at the SCAN'05 : Séminaire de conception architecturale numérique.
- Bruxelles, S., Greco, L., Mondada, L., & Traverso, V. (2009). La co-conception du point de vue de l'analyse interactionniste. In F. Détienne & V. Traverso (Eds.), *Méthodologies d'analyse de situations coopératives de conception : Corpus MOSAIC*. Nancy: Presses Universitaires de Nancy.
- Bucciarelli, L. (2002). Between thought and object in engineering design. *Design Studies*, 23, 219-231.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Hebert, A.-M., Perron, L., Safin, S., & Leclercq, P. (2009). *An approach to assess the quality of collaboration in technology-mediated design situations*. Paper presented at the ECCE 2009 : European Conference on Cognitive Ergonomics.
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Moutsingua-Mpaga, L., Perron, L., Safin, S., & Leclercq, P. (2008). Conception architecturale collaborative avec un « bureau augmenté » : une étude exploratoire de l'effet de la distance et de la co-localisation. In P. Negroni & Y. Haradji (Eds.), *Ergonomie et Conception : Actes de SELF 2008, 43ème congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*. Lyon, France: ANACT.

- Busby, J. S. (2001). Error and distributed cognition in design. *Design studies*, 22, 233-254.
- Carroll, J. M., Neale, D. C., Isenhour, P. L., Rosson, M. B., & McCrickard, D. S. (2003). Notification and awareness : synchronizing task-oriented collaborative activity. *International Journal Of Human-Computer Studies*, 58, 605-632.
- Chevalier, A., & Bonnardel, N. (2003). Prise en compte et gestion de contraintes: une étude dans la résolution d'un problème créatif de conception. *Bulletin de psychologie*, 56(1), 33-48.
- Chevalier, A., & Cegarra, J. (2008). Une approche psychologique de la notion de contrainte en résolution de problèmes. *Le Travail Humain*, 71(2), 173-198.
- Clarck, H., & Brennan, S. (1991). Grounding in communication. In L. Resnick, J. Levine & S. Teasley (Eds.), *Perspectives on Socially Shared Cognition*. Washington: American Psychological Association.
- Collins, A.M., & Quillian, M.R. (1969). Retrieval time for semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 8, 240-247.
- Corroyer, D., & Rouanet, H. (1994). Sur l'importance des effets et ses indicateurs dans l'analyse statistique des données. *L'année psychologique*, 94(4), 607-623.
- Coutaz, J., & Nigay, L. (1994). *Les propriétés « CARE » dans les interfaces multimodales*. Paper presented at the conférence IHM'94.
- Cox, R. (1999). Representation construction, externalised cognition and individual differences. *Learning and Instruction*, 9, 343-363.
- Coyette, A., Vanderdonckt, J. & Limbourg, Q. (2006). SketchiXML: A Design Tool for Informal User Interface Rapid Prototyping. in N. Guelfi and D. Buchs (Eds.): *RISE 2006*. Berlin : Springer-Verlag, 160–176.
- Csikszentmihalyi, M. (1997). *Creativity: Flow and the psychology of discovery and invention*. New York: Harper Collins.
- Dachselt, R., Frisch, M., & Decker, E. (2008). *Enhancing uml sketch tools with digital pens and paper*. Paper presented at the 4th ACM symposium on Software visualization.
- Darses, F. (1992). *Mécanismes cognitifs de gestion de contraintes dans la résolution de problèmes de conception*. Paper presented at the ERGO-IA '92, Biarritz, France.
- Darses, F. (2004). *Processus psychologiques de résolution collective des problèmes de conception : contribution de la psychologie ergonomique*. Unpublished HDR - habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris V - René Descartes.
- Darses, F., Détienne, F., & Visser, W. (2001). *Assister la conception: perspectives pour la psychologie cognitive ergonomique*. Paper presented at the ÉPIQUE 2001, Actes des journées d'étude en psychologie ergonomique.
- Darses, F., & Falzon, P. (1996). La conception collective: une approche de l'ergonomie cognitive. In G. de Terssac & E. Friedberg (Eds.), *Coopération et Conception*. Toulouse : Octarès. (pp. 123-135). Toulouse: Octarès.
- Darses, F., Falzon, P., & Béguin, P. (1996). *Collective design processes*. Paper presented at the COOP 96, Second International Conference on the Design of Cooperative Systems, Juan-les-Pins.

- Dawans, A., Demaret, J.-N., Safin, S., Schmitz, D., & Leclercq, P. (2009). Principes de modélisation pour la simulation acoustique. In J.-C. Bignon, G. Halin & S. Kubicki (Eds.), *Conception architecturale et numérique et approches environnementales : Actes de SCAN 2009, 3ème séminaire de Conception Architecturale Numérique*. Nancy, France: Presses universitaires de Nancy.
- Decortis, F., Boulanger, C. & Safin, S. (2007). Projet ICC - Rapport final. Rapport interne projet ICC (ref. RW-ULg n° 03/1/5438). Université de Liège
- Defays, A., Safin, S., Billon, A., Decaestecker, C., & Warzée, N. (2009). *Influence d'images évocatrices et distractrices sur une tâche de jugement en acoustique des salles* Paper presented at the IHM09 : Conférence francophone sur l'interaction homme-machine.
- Defays, A., Safin, S., Billon, A., Decaestecker, C., & Warzée, N. (2010). *Influence de la modalité visuelle sur l'évaluation acoustique de salles*. Paper presented at the 45ème congrès de la SELF - Société d'ergonomie de langue française.
- Defays, A., Safin, S., Darses, F., Mayeur, A., Ben Rajeb, S., Lecourtois, C., Guéna, F. & Leclercq, P. (in press). *Invisible computer for collaborative design : evaluation of a multimodal sketch-based environment*. Paper accepted at the 18th World Congress of Ergonomics, IEA 2012.
- Denis, M. (1979). *Les images mentales*. Paris : Presses Universitaires de France.
- de Terssac, G., & Chabaud, C. (1990). Référentiel opératif commun et fiabilité. In J. Leplat, & G. de Terssac (Éds.), *Les facteurs humains de la fiabilité* (pp. 110-139). Marseille : Octarès/Entreprises.
- Détienne, F. (2006). Collaborative design: Managing task interdependencies and multiple perspectives. *Interacting with Computers*, 18(1), 1-20.
- Détienne, F., Baker, M., & Visser, W. (2009). La co-conception du point de vue cognitif et interactif. In F. Détienne & V. Traverso (Eds.), *Méthodologies d'analyse de situations coopératives de conception : Corpus MOSAIC*. Nancy: Presses Universitaires de Nancy.
- Détienne, F., Boujut, J.-F., & Hohmann, B. (2004). *Characterization of collaborative design and interaction management activities in a distant engineering design situation*. Paper presented at the COOP 2004 - Cooperative systems design: scenario-based design of collaborative systems.
- Détienne, F., Martin, G., & Lavigne, E. (2005). Viewpoints in co-design: a field study in concurrent engineering. *Design Studies*, 26, 215-241.
- Détienne, F., & Visser, W. (2006). *Multimodality and parallelism in design interaction: co-designers' alignment and coalitions*. Paper presented at the 2006 conference on Cooperative Systems Design: Seamless Integration of Artifacts and Conversations-Enhanced Concepts of Infrastructure for Communication.
- Détienne, F., Visser, W., & Tabary, R. (2006). Articulation des dimensions graphico-gestuelle et verbale dans l'analyse de la conception collaborative. *Psychologie de l'interaction*, 21.
- de Vries, B. & Achten, H.H. (2002). DDDoolz: designing with modular masses. *Design Studies*, 23, 515-531
- Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: co-evolution of problem-solution. *Design Studies*, 22(5), 425-437.
- Dorta, T. (2008). Design Flow and Ideation. *International Journal of architectural computing*, 6(3), 299-316.

- Dorta, T., Kalay, Y., Pérez, E., & Lesage, A.-M. (2011). *Comparing immersion in remote and local collaborative ideation through sketches: a case study*. Paper presented at the CAAD Futures 2011.
- Drozd, C., & Amphoux, P. (2008). *Les ambiances dans la conception architecturale : une « histoire » des représentations*. Paper presented at the Colloque international « Faire une ambiance ».
- Dumas, J.S. & Reddish, J.C. (1999). *A practical guide to usability testing*. Exeter, UK : Intellect Books.
- Dumazeau, C., & Karsenty, L. (2004). *Améliorer le contexte mutuellement partagé lors de communications distantes avec un outil de désignation*. Paper presented at the ERGO'IA 2004, Biarritz, France.
- Eisenberger, R., & Rhoades, L. (2001). Incremental effects of reward on creativity. *Journal of Personality and Social Psychology*, 81, 728–741.
- Elsen, C., & Dawans, A. (2010). *Pratiques nouvelles en conception industrielle: adaptation des acteurs, des objets médiateurs et des modalités de travail*. Paper presented at the 45ème congrès de la Société d'ergonomie de langue française : fiabilité, Adaptation et résilience.
- Falzon, P. (1994). Dialogues fonctionnels et activité collective. *Le Travail Humain*, 57(4), 299- 312.
- Falzon, P. (2004) Nature, objectifs et connaissances de l'ergonomie. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 17-36). Paris: PUF.
- Ferguson, E.S. (1992). *Engineering and the mind's eye*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Folcher, V., & Rabardel, P. (2004). Hommes, artefacts, activités : perspective instrumentale. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 251-268). Paris: PUF.
- Foulon-Molenda, S. (2000). At-on besoin de se voir pour coopérer? Contribution théorique issue de la psycho-linguistique. *Le Travail Humain*, 63(2), 97-120.
- Galina, J.-M. (2006). *Les représentations mentales*. Paris: Dunod.
- Gibson, J. J. (1978). The ecological approach to the visual perception of pictures. *Leonardo*, 11, 227-235.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to perception*. Boston: Houghton Mifflin,
- Goel, V. (1995). *Sketches of Thought*. Cambridge, MA: Bradford-MIT Press.
- Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity research journal*, 4(2), 123-143.
- Goldschmidt, G. (2003). The backtalk of self-generated sketches. *Design Issues*, 19(1), 72-88.
- Goldschmidt, G., & Tatsa, D. (2005). How good are good ideas? Correlates of design creativity. *Design Studies*, 26, 593-611.
- Graves, M. (1981). *Le Corbusier's drawn references. Introduction to Le Corbusier's selected drawings*. Rizzoli, New York.
- Gronier, G., Brangier, E., Sagot, J., & Gouin, V. (2000). *Les outils de travail coopératif assisté par ordinateur: approche ergonomique*. Paper presented at Confère, Marseille.
- Gronier, G., & Sagot, J.-C. (2007). *Le rôle des communications dans les projets de conception de produits: Comparaison des situations de travail collectif en présence et à distance*. Paper presented at the ARCo'07 : Cognition, Complexité, Collectif

- Gross, M., & Do, E. (2000). Drawing on the Back of an Envelope: a framework for interacting with application programs by freehand drawing. *Computers & Graphics*, 24, 835-849.
- Hahn, J., & Kim, J. (1999). *Why are some representations (sometimes) more effective?* Paper presented at the 20th international conference on Information Systems.
- Haller, M., Brandl, P., Leithinger, D., Leitner, J., Seifried, T., Billinghamurst, M. (2006) Shared Design Space: Sketching ideas using digital pens and a large augmented tabletop setup. *Proceedings of ICAT'06*.
- Hannibal, C., Brown, A., & Knight, M. (2005). An assessment of the effectiveness of sketch representations in early stages design. *International Journal of architectural computing*, 3(1), 107-125.
- Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). *A new approach of innovative design : an introduction to C-K Theory*. Paper presented at the International conference on engineering design.
- Hebert, A.-M. (2008). *Vers une méthode d'évaluation de la qualité de la collaboration en conception assistée par des technologies d'information et de communication*. Unpublished Master Thesis, Université Paris Descartes.
- Heiner, J., Tversky, B., & Silverman, M. (2004). *Sketches for and from collaboration*. Paper presented at the Visual and spatial reasoning in design III, Key Centre for Design Research, Sydney.
- Herot, C. F. (1976). Graphical Input Through Machine Recognition of Sketches. *Proceedings of the Third Annual Conference on Computer Graphics, Interactive Techniques and Image Processing, ACM/SIGGRAPH*.
- Heylighen, A., & Martin, G. (2002). *That elusive concept of concept in architecture*. Paper presented at the DCC'04 : Design Computing and Cognition.
- Huot, S., Dumas, C. & Hégron, G. (2004). *Svalabard: une table à dessin virtuelle pour la modélisation 3D*. Actes de la conférence IHM 2004.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Ishii, H., Kobayashi, M. & Grudin, J. (1993). Intergration of Interpersonal Space and Shared Workspace : ClearBoard Design and Experiments. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 11 (4), 349-375
- Johnson, G., Gross, M. D., Hong, J. & Do, E. (2008). Computational Support for Sketching in Design: A Review. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2(1), 1-93
- Juchmes, R., Dawans, A., Delfosse, V., Dawans, A., & Leclercq, P. (2009). Modélisation architecturale pour l'évaluation de la performance énergétique. In J.-C. Bignon, G. Halin & S. Kubicki (Eds.), *Conception architecturale et numérique et approches environnementales : Actes de SCAN 2009, 3ème séminaire de Conception Architecturale Numérique*. Nancy, France: Presses universitaires de Nancy.
- Juchmes, R., Delfosse, V., Safin, S., & Leclercq, P. (2009). Spécification géométrique des concepts architecturaux dans le cadre de la thermique du bâtiment. In T. Tidafi & T. Dorta (Eds.), *HJoindre langages, cultures et visions, Proceedings of CAAD Futures 2009* (pp. 443-457). Montréal, Canada: Presses Universitaires de Montréal.
- Juchmes, R., Leclercq, P., & Azar, S. (2004). *A multi-Agent System for Architectural Sketches Interpretation*. Paper presented at the Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling.

- Juchmes, R., Leclercq, P., & Azar, S. (2005). A freehand sketch environment for architectural design supported by a multi-agent system. *Special issue of Computers and Graphics on Calligraphic Interfaces*, 29(6), 905-915.
- Jung, T., Gross, M. D., & Do, E. Y. L. (2002). *Sketching annotations in a 3D web environment*. Paper presented at the CHI'02 extended abstracts on Human factors in computing systems.
- Kavalki, M., Suwa, M., Gero, J., & Purcell, A. (1999). Sketching interpretation in novice and expert designers. In J. Gero & B. Tversky (Eds.), *Visual Reasoning in Design*, (pp. 209-219). Sydney: Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sydney.
- Kim, M. J., & Maher, M.-L. (2008). The Impact of Tangible User Interfaces on Designers' Spatial Cognition. *Human-Computer Interaction*, 23(2), 101-137.
- Kirsh, D. (2010). Thinking with external representations. *AI & Society*, 25(4), 441-454.
- Koutamanis, A. (2005). *Sketching with Digital Pen and Paper*. Paper presented at the Computer Aided Architectural Design Futures 2005.
- Kosslyn, S.M. (1980). *Image and Mind*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Kubicki, S., Bignon, J.-C., Elsen, C., & Leclercq, P. (2008). *DCDS - Distant Collaborative Design Studio. An Initial Experimentation in Distant Collaborative Design Studio in Architecture*. Paper presented at the 26th eCAADe Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe.
- Kubicki, S., Bignon, J.-C., & Leclercq, P. (2008). Cooperative Digital Studio IT-supported cooperation for AEC students. In L. Rishmoller (Ed.), *Improving the Management of Construction Projects through IT Adoption*.
- Kubicki, S., Guerriero, A. & Johannsen, L. (2009). A service-based innovation process for improving cooperative practices in AEC. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 14, 654-673.
- Kvan, T. (2000). Collaborative design : what is it? *Automation in Construction*, 9, 409-415.
- Landay, J., & Myers, B. (2001). Sketching interfaces: Toward more human interface design. *Computer*, 34, 56-64.
- Larkin, J. H., & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11, 65-100.
- Lebahar, J.-C. (1983). *Le dessin d'architecte. Simulation graphique et réduction d'incertitude*. Paris: Editions Parenthèses.
- Leclercq, P. (1994). *Environnement de conception architecturale pré-intégrée. Eléments d'une plate-forme d'assistance basée sur une représentation sémantique*. Liège, Belgium: Editions de l'Université de Liège.
- Leclercq, P. (1999). Interpretative tool for architectural sketches. In J. Gero & B. Tversky (Eds.), *Visual and Spatial Reasoning in Design* (pp. 69-80). Sydney, Australia: Key Centre of Design Computing and Cognition.
- Leclercq, P. (2004). Invisible Sketch Interface in Architectural Engineering. *Graphic recognition, recent Advanced and Perspectives, Lecture Notes in Computer Science, LNCS, 3088*, 353-363.
- Leclercq, P. (2005). *Le concept d'esquisse augmentée*. Paper presented at the SCAN'05 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique.

- Leclercq, P. & Detheux, A. (2009). Etat de l'art des systèmes synchrones de collaboration distante graphique. Rapport interne Projet ANR Cocréa (Livrabable T3b - P1.2 - L1). Université de Liège
- Leclercq, P., & Elsen, C. (2007). *Le croquis synthé-numérique*. Paper presented at the SCAN'05 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Paris, France.
- Leclercq, P., & Heylighen, A. (2002). *5,8 Analogies per hour. A designer's view on analogical reasoning*. Paper presented at the AID'02 Artificial intelligence in design
- Leclercq, P., Mayeur, A., & Darses, F. (2007). *Production d'esquisses créatives en conception digitale*. Paper presented at the IHM'07, 17e conférence francophone sur l'Interaction Homme Machine.
- Leplat, J. & Hoc, J.-M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de psychologie cognitive*, 3 (1), 49-63
- Lim, C.-K. (2003). *Is a pen-based system just another pen or more than a pen?* Paper presented at the 21th eCAADe Conference.
- Mackay, W., & Fayard, A.-L. (1999). Designing interactive paper: lessons from three augmented reality projects. *Augmented Reality-Placing Artificial Objects in Real Scenes. Proc. of IWAR, 98*, 81–90.
- Maher, M., Paulini, M., & Murty, P. (2010). *Scaling up: from individual to collaborative design to collective design*. Paper presented at the DCC'10 : Design Computing and Cognition.
- Martin, C. (2004). L'ergonome dans les projets architecturaux. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 421–436). Paris: PUF.
- Martin, G., Détienne, F., & Lavigne, E. (2001). *Analysing viewpoints in design through the argumentation process*. Paper presented at the 8th TC13 IFIP International Conference on Human-Computer Interaction - INTERACT 2001.
- Martin, J.-C. (1998). TYCOON : Theoretical Framework and Software Tools for Multimodal Interfaces. In J. Lee (Ed.), *Intelligence and Multimodality in Multimedia Interfaces*: AAAI Press.
- Mayeur, A., Darses, F., & Leclercq, P. (2007a). *Apports de la visualisation de maquettes virtuelles 3D en phase d'esquisse architecturale*. Paper presented at the Epique'07, Congrès de la Société Française de Psychologie.
- Mayeur, A., Darses, F., & Leclercq, P. (2007b). *Evaluation ergonomique d'une tablette graphique d'aide à la conception architecturale*. Paper presented at the SELF'07, 42ème congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française.
- McCall, R., Vlahos, E., & Zabel, J. (2001). *Conceptual design as hypersketching*. Paper presented at the CAAD Futures 2001 : Computer aided architectural design futures 2001.
- McGown, A., Green, G., & Rodgers, P. (1998). Visible ideas: information patterns of conceptual sketch activity. *Design studies*, 19, 431-453.
- Meier, A., Spada, H., & Rummel, N. (2007). A rating scheme for assessing the quality of computer-supported collaboration processes. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 2, 63-86.
- Mer, S., Jeantet, C., & Tichkiewitch, S. (1995). Les objets intermédiaires de la conception: modélisation et communication. In J. Caelen & K. Zreik. (Eds.), *Le Communicationnel pour Concevoir* (pp. 21-41). Paris: Europa Productions.

- Nielsen, J. (1994). *Usability inspections methods*. Paper presented at CHI'94. Boston, MA.
- Norman, D. (1991). Cognitive artifacts. In J. M. Carroll (Ed.), *Designing interaction: Psychology of the human-computer interface*. New York: Cambridge University Press.
- Norman, D. (1998). *The invisible computer: why good products can fail, the personal computer is so complex, and information appliances are the solution*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Norman, D. (2010). Natural User Interfaces are not Natural. *Interactions*, 17(3).
- Ochanine, D. (1978). Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail. *Psychologie et éducation*, 3, 63-65.
- Oh, Y., Do, E. Y. L., & Gross, M. D. (2004). Intelligent critiquing of design sketches. In J. L. Randall Davis, T. Stahovich, R. Miller & E. Saund (Eds.), *Making Pen-Based Interaction Intelligent and Natural* (pp. 127-133). Arlington, Virginia: AAAI Press.
- Olsen, L., Samavati, F.F. Sousa, M. C. & Jorge, J. A. (2009). Sketch-based modeling: A survey. *Computers & Graphics*, 33, 85–103.
- Olson, G. M., & Olson, J. S. (2000). Distance Matters. *Human-Computer Interaction*, 15, 139-178.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27, 229-265.
- Pahl, G., Badke-Schaub, P., & Frankenberger, E. (1999). Resume of 12 years interdisciplinary empirical studies of engineering design in Germany. *Design Studies*, 20, 481-494.
- Pauchet, A., Coldefy, F., Lefebvre, L., Picard, L., Bouguet, A., Perron, L., et al. (2007). *Interactions Collaboratives en Situations Co-localisée et Distante*. Paper presented at the MFI 07, Paris.
- Pavlidis, T., Van Wyk, C. J. (1985). An Automatic Beautifier for Drawing and Illustrations. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics archive*, 19(3), 225-234.
- Piccolotto, M. A. (1998). *Sketchpad+ : architectural medeling through perspective sketching on a pen-based display*. Master of Science Thesis, Cornwell University.
- Plimmer, B., & Apperley, M. (2002). Computer-aided sketching to capture preliminary design. *Proceedings of AUIC2002, Third Australian User Interface Conference*, 9-12.
- Plimmer, B., & Apperley, M. (2004). INTERACTING with sketched interface designs: an evaluation study. *Proceeding of CHI'04* 1337-1340.
- Plimmer, B., Tang, G., & Young, M. (2006). *Sketch Tool Usability: Allowing the user to disengage*. Paper presented at the HCI 2006 : People and Computers XX
- Prost, R. (1992). *Conception architecturale. Une investigation méthodologique*. Paris: L'Harmattan.
- Prudhomme, G., Marin, P. & Maslet, C. (2010). An annotation tool to ease interactions and design decisions making report in project review context. *Proceedings of Global Congress on Manufacturing and Management 2010*, Bangkok : Thaïlande.
- Purcell, A., & Gero, J. (1998). Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design studies*, 19, 389-430.
- Queré (1997) La situation toujours négligée ? *Réseaux*, 85. Paris : CNET
- Rabardel, P. (1995). *Les Hommes et les Technologies. Approche Cognitive des Instruments Contemporains*. Paris: Armand Colin.

- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13, 257-266.
- Rasmussen, J. (1990). Mental models and the control of action in complex environments. In D. Ackerman & M. J. Tauber (Eds.), *Mental models and human computer interaction*. (pp. 41-69). Amsterdam: North Holland.
- Reason, J. (1993). *L'erreur humaine*. Paris: Presses universitaires de France.
- Rodgers, P., Green, G., & McGown, A. (2000). Using concept sketches to track design progress. *Design studies*, 21, 451-464.
- Roschelle, J., & Teasley, S. (1994). The construction of shared knowledge in collaborative problem solving. In C. E. O'Malley (Ed.), *Computer Supported Collaborative Learning* (pp. 69-97). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Safin, S., Boulanger, C., & Leclercq, P. (2005a). Premières évaluation d'un Bureau Virtuel pour un processus de conception augmenté. *Proceedings of IHM 2005, 17ème conférence francophone sur l'interaction homme-machine* (pp. 107-114). New York: ACM.
- Safin, S., Boulanger, C., & Leclercq, P. (2005b). A Virtual Desktop's First evaluation for an Augmented Design Process. *Proceedings of Virtual Concept 2005*. Biarritz, France.
- Safin, S., Burkhardt, J.-M., Buisine, S., Kahrimanis, G., & Charoy, F. (2010). Workshop Proceedings of 9th International Conference on the Design of Cooperative Systems. Report on discussion Group 1. *International reports on socio-informatics*, 7(1).
- Safin, S., Delfosse, V., & Leclercq, P. (2010). Mixed-reality prototypes to support early creative design. In E. Dubois, P. Gray & L. Nigay (Eds.), *The Engineering of Mixed Reality Systems*. (pp. 419-445). London: Springer.
- Safin, S., Juchmes, R., & Leclercq, P. (in press). Du crayon au stylo numérique : influences des interprétations numériques sur l'activité graphique en tâches de conception. *Journal d'Interaction Personne-Système*.
- Safin, S., Kubicki, S., Bignon, J.-C., Leclercq, P. (2011). *Digital Collaborative Studio : 4 years of practice*. Poster presented at the CAAD Futures 2011 Conference.
- Safin, S., & Leclercq, P. (2009). User studies of a sketch-based collaborative distant design solution in industrial context. *Lectures Notes in Computer Sciences : Proceedings of CDVE 2009. The 6th International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering*, 5738, 117-124.
- Safin, S., Leclercq, P., & Blavier, A. (2008a). Errors in architectural design process : towards a cognitive model. In M. S. D. Marjanovic, N. Pavkovic & N. Bojcetij (Ed.), *Proceedings of Design 2008 : International Design Conference*. Dubrovnik, Croatia.
- Safin, S., Leclercq, P., & Blavier, A. (2008b). *Multidisciplinary approach to study of design cognitive process: the case of human errors in architectural preliminary design*. Paper presented at the Worskop "Design Thinking". DCC 2008, Design Computing and Cognition, Atlanta.
- Safin, S., Leclercq, P. & Decortis, F. (2007) Impact d'un environnement d'esquisses virtuelles et d'un modèle 3D précoce sur l'activité de conception architecturale. *Revue d'Interaction Homme-Machine*, 8(2),. 65-98
- Safin, S., Pecceu, M. & Leclercq, P. (2007). Interface-croquis pour relevés architecturaux. Vers la constitution d'une nouvelle activité. *Proceedings of IHM07 : Conférence francophone sur l'interaction homme-machine*. Paris, novembre 2007

- Safin, S., Verschuere, A., Burkhardt, J.-M., & Détienne, F. (2010). *Adaptation mutuelle du processus de conception, du rôle de l'enseignant et de la qualité de la collaboration dans une situation de conception collaborative à distance*. Paper presented at the 45ème congrès de la SELF - Société d'ergonomie de langue française.
- Safin, S., Verschuere, A., Burkhardt, J.-M., Détienne, F., & Hebert, A.-M. (2010). Workshop Proceedings of 9th International Conference on the Design of Cooperative Systems. Quality of collaboration in a distant collaborative architectural educational setting. *International reports on socio-informatics*, 7(1).
- Scaife, M., & Rogers, Y. (1996). External cognition: How do graphical representations work? *International Journal Of Human-Computer Studies*, 45, 185-213.
- Schmidt, K. (1993). Cooperative Work and its Articulation: Requirements for Computer Support. *Le Travail Humain*, 57(4), 345-366.
- Schmidt, K., & Wagner, I. (2004). Ordering systems : coordinative practices and artifacts in architectural design and planning. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 13, 349-408.
- Schön, D. (1983). *The reflexive practitioner : How professional think in action*. New York: Basic Books.
- Schweikardt, E., & Gross, M. (2000). Digital clay: deriving digital models from freehand sketches. *Automation in Construction*, 9, 107-115.
- Scott, S.D., Grant, K.D., & Mandryk, R.L. (2003). System Guidelines for Co-located, Collaborative Work on a Tabletop Display. *Proceedings of ECSCW'03, European Conference Computer-Supported Cooperative Work 2003*, Helsinki, Finland, September 14-18, 2003.
- Sellen, A.J. (1994). Detection of everyday errors. *Applied Psychology: An International Review*, 43, 475-498.
- Simon, H.A. (1969). *The Science of the Artificial*. Cambridge, MA : MIT Press
- Spada, H., Meier, A., Rummel, N., & Hauser, S. (2005). *A new method to assess the quality of collaborative process in CSCL*. Paper presented at the Conference on Computer support for collaborative learning : learning 2005: the next 10 years!
- Stempfle, J., & Badke-Schaub, P. (2002). Thinking in design teams-an analysis of team communication. *Design studies*, 23, 473-496.
- Sternberg, R. J. (2006). The nature of creativity. *Creativity research journal*, 18(1), 87-98.
- Stokes, P. (2009). Using constraints to create novelty: A case study. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 3(3), 174-180.
- Suchman, L. (1987). *Plans and situated actions : the problem of human-machine communication*. Cambridge University Press
- Sutherland, I.E. (1964). *Sketchpad: A man-machine graphical communication system*. Technical Report 574, University of Cambridge, Computer Laboratory.
- Suwa, M., Gero, J., & Purcell, A. (1998). *The Roles of Sketches in Early Conceptual Design Processes*. Paper presented at the Twentieth annual meeting of the cognitive sciences society, Hillsdale, NJ.
- Suwa, M., Gero, J., & Purcell, T. (2000). Unexpected discoveries and S-invention of design requirements: important vehicles for a design process. *Design studies*, 21, 539-567.

- Suwa, M., & Tversky, B. (1997). What do architects and students perceive in their design sketches? A protocol analysis. *Design Studies*, 18, 385-403.
- Stenning, K., & Oberlander, J. (1995). A cognitive theory of graphical and linguistic reasoning: logic and implementation. *Cognitive Science*, 19(1), 97-140.
- Taggart, J. R. (1973) *Reading sketches by HUNCH*. Master of Sciences Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Tang, H., Lee, Y., & Gero, J. (2010). Comparing collaborative co-located and distributed design processes in digital and traditional sketching environments: A protocol study using the function-behaviour-structure coding scheme. *Design Studies*, 1-29.
- Traverso, V. (2009). Co-élaboration de solutions et rôle du graphico-gestuel : analyse interactionnelle. In F. Détienne & V. Traverso (Eds.), *Méthodologies d'analyse de situations coopératives de conception : Corpus MOSAIC*. Nancy: Presses Universitaires de Nancy.
- Tversky, B. (2002). *What do Sketches say about Thinking*. Paper presented at the AAAI Spring Symposium, Sketch Understanding Workshop, Stanford University.
- Van der Lugt (2000). Developing a graphic tool for creative problem solving in design groups. *Design Studies*, 21, 505-522
- Van de Vreken, A., & Safin, S. (2010). *Influence du type de représentation visuelle sur l'évaluation de l'ambiance d'un espace architectural* Paper presented at the IHM10 : Conférence francophone sur l'interaction homme-machine.
- Vandamme, J.-F., Safin, S., & Leclercq, P. (2007). *Modalités d'interaction sur interface gestuelle : première évaluation des usages spontanés*. Paper presented at the Atelier tables interactives - IHM'07, 17e conférence francophone sur l'Interaction Homme Machine, IRCAM, Paris, France.
- Visser, W. (2001). *Conception individuelle et collective. Approche de l'ergonomie cognitive*. Le Chesnay, France: INRIA - Institut national de la Recherche en Informatique et Automatique.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Visser, W. (2009a). Co-élaboration de solutions et rôle du graphico-gestuel : point de vue de la psychologie ergonomique. In F. Détienne & V. Traverso (Eds.), *Méthodologies d'analyse de situations coopératives de conception : Corpus MOSAIC*. Nancy: Presses Universitaires de Nancy.
- Visser, W. (2009b). La conception: de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le travail humain*, 72(1), 61-78.
- Voyiatzaki, E., Meier, A., Kahrimanis, G., Rummel, N., Spada, H., & Avouris, N. (2008). *Rating the quality of collaboration during networked problem solving activities*. Paper presented at the 6th International Conference on Networked Learning, Halkidi.
- Wallace, G. (1926). *The art of thought*. New York : Harcourt Brace
- Watzlawick, P & Helmick, J. (1979). *Une logique de la communication*. Paris : Le livre de poche.
- Ward, T. (2001). Creative Cognition, Conceptual Combination, and the Creative Writing of Stephen R. Donaldson. *American Psychologist*, 56(4).
- Wolff, M., Burkhardt, J.-M., & De La Garza, C. (2005). Analyse exploratoire de "points de vue" : une contribution pour outiller les processus de conception. *Le Travail Humain*, 68(3), 253.

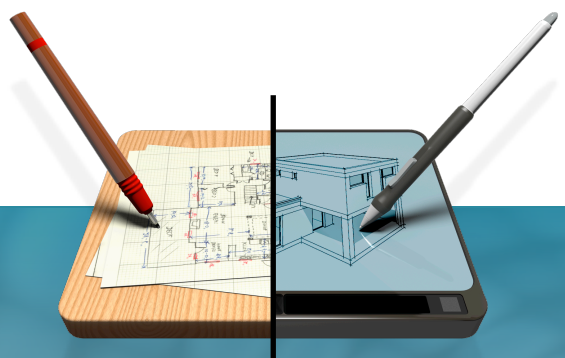
- Zacklad, M. (2006). Annotation : attention, association, contribution. In P. Salembier & M. Zacklad (Eds.), *Annotations dans les Documents pour l'Action* (pp. 29-46). Paris: Lavoisier.
- Zacklad, M., Lewkowicz, M., Boujut, J.-F., Darses, F., & Détienne, F. (2003). *Formes et gestion des annotations numériques collectives en ingénierie collaborative*. Paper presented at the Knowledge Engineering, Laval.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive science*, 21(2), 179-217.
- Zhang, J. (2000). External representations in complex information processing tasks. In A. Kent (Ed.), *Encyclopedia of library and information science* (Vol. 68, pp. 164-180): Citeseer.
- Zhang, J., & Norman, D. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive science*, 18, 87-122.
- Zhang, J., & Norman, D. (1995). A representational analysis of numeration systems. *Cognition*, 57, 271-295.

ANNEXES

Annexe 1 : énoncé utilisé dans la première et la deuxième étude

Annexe 2 : énoncé de l'atelier collaboratif (troisième étude)

Annexe 3 : grille d'analyse de la collaboration



Annexe 1 : énoncé utilisé dans la première et la deuxième étude

Programme Architectural - Ecole rurale¹

COURS DE PROCESSUS DE CONCEPTION
TP 2e MASTER IR ARCHITECTES

EXERCICE DE CONCEPTION COLLABORATIVE

Voici l'énoncé d'un projet architectural. Il s'agit de concevoir, avec votre collègue architecte, une école secondaire, répondant aux contraintes énoncées ci-dessous.

Le temps qui vous est proposé est d'1h30. Le niveau de détail attendu de l'esquisse doit tendre vers une représentation graphique communicable à un "client".

Concevoir une école secondaire de 240 élèves répondant aux contraintes énoncées ci-dessous. Le budget est confortable. Le programme architectural doit impérativement être respecté.

Le terrain, de pente nord est constitué de 2 plateaux séparés par une marche de 3 mètres en rocher (le sous-sol n'est pas exploitable). Il est environné de prairies ou vergers et présente un arbre remarquable à préserver.

Programme architectural

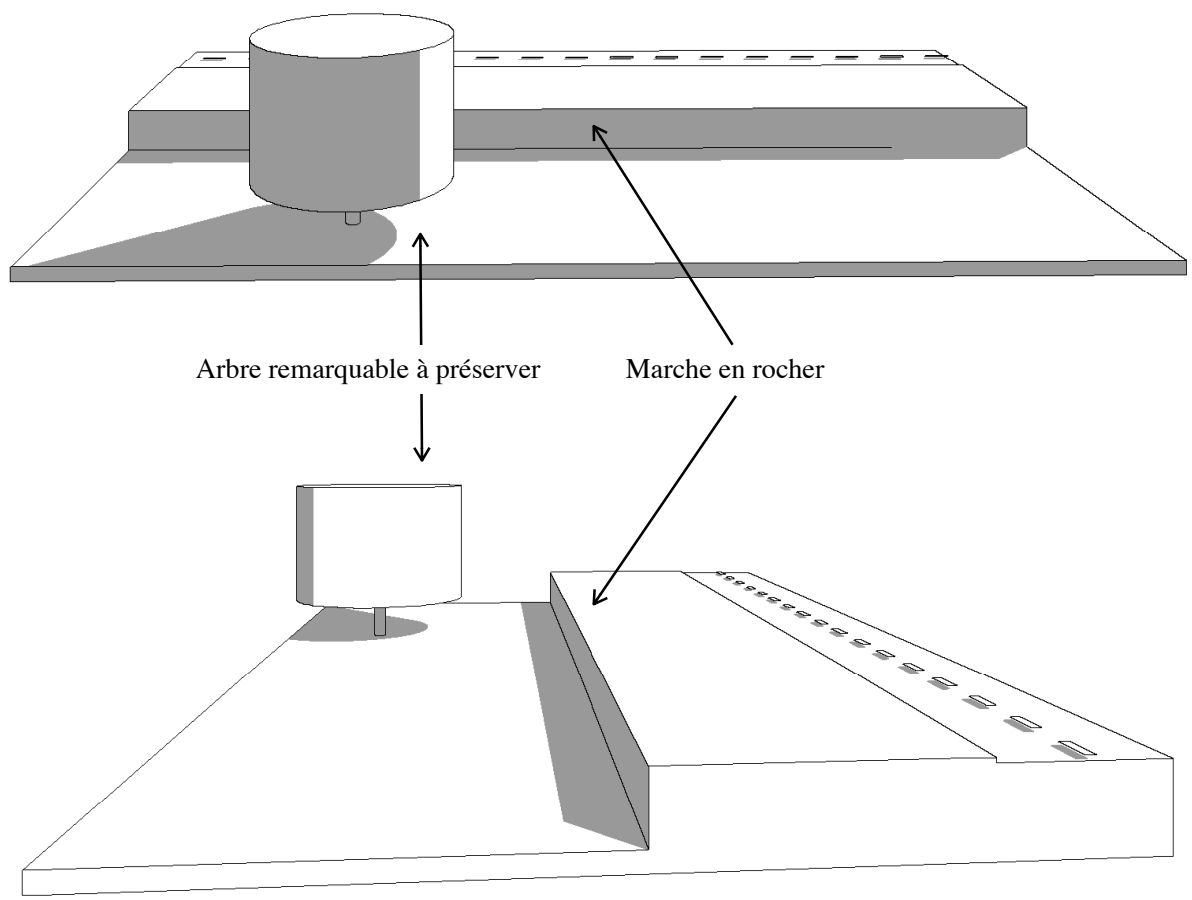
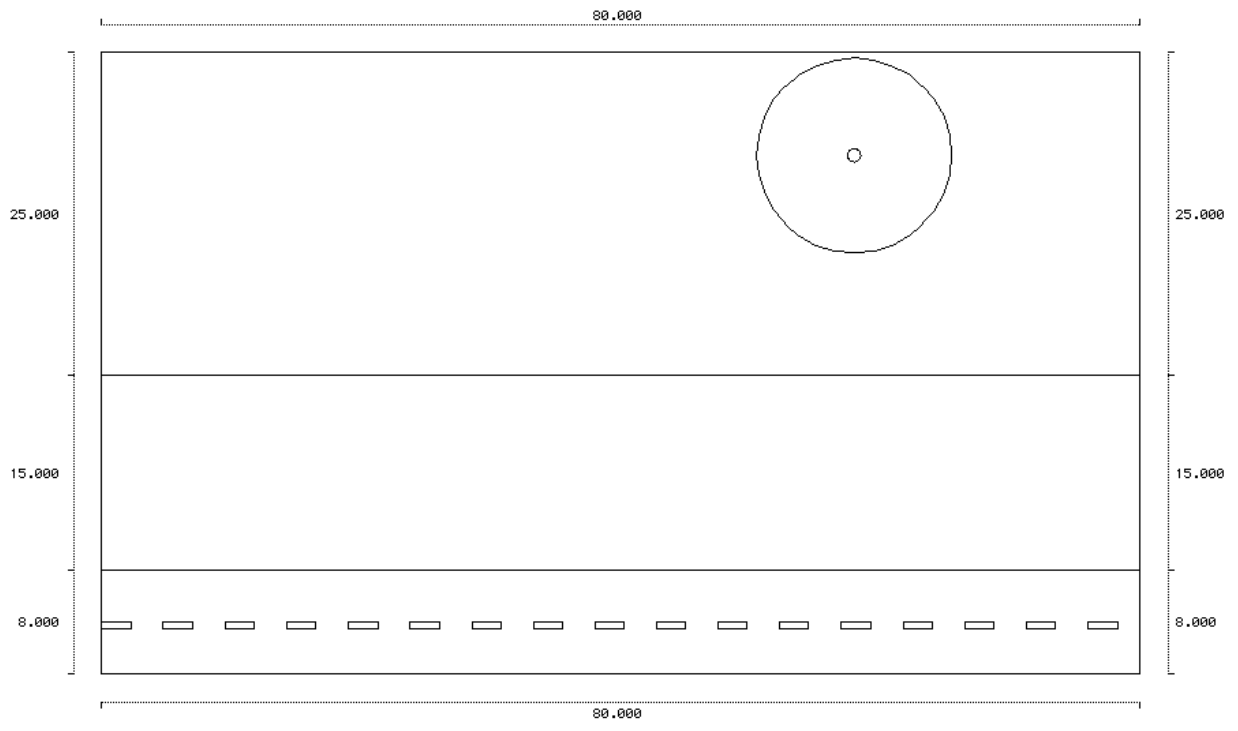
- Classes de 40 élèves, compter 70 m² par classe.
Si la largeur d'une classe est supérieure à 6m 50, y prévoir un éclairage naturel bilatéral.
- Cour : compter environ 4 m² par élève, possibilité de la scinder en deux espaces séparés, mais pas plus, car l'école fonctionne en deux cycles; un préaut est nécessaire.
- Salle des professeurs (60 m²), bureau du directeur (25 m²) et son antichambre (15 m²), secrétariat (30 m²).
- Bibliothèque (55 m²).
- Réfectoire : 1 m² par élève, cuisine (70 m²) avec accès des fournisseurs et réserve (30 m²).
- Sanitaires : 1 siège et 2 urinoirs pour 40 élèves.
- Infirmerie (25 m²) et chaufferie (30 m²).
- Prévoir les surfaces nécessaires de circulation :
un passage couvert et chauffé entre tous les locaux est exigé.
La distance maximale entre la sortie de tout local et une sortie de secours (ou l'accès à une cage d'escalier) ne peut dépasser 20 m pour des raisons de sécurité incendie.
La largeur minimale des couloirs des classes est de 2m 50; ces couloirs doivent bénéficier d'un éclairage naturel minimal.

Contraintes urbanistiques

- Front d'alignement à 7 mètres de la rue (la façade principale doit obligatoirement se trouver le long de cette limite).
- Système de plateau drainant pour les égouts, dans la partie en aval.

Exigences particulières de passage

	1	2	3	4	5	6	7
1. directeur	-	X					
2. secrétariat	X	-					
3. bibliothèque			-	X			
4. salle des profs			X	-			
5. réfectoire					-	X	X
6. cuisine					X	-	
7. réserve					X		-



*Annexe 2 : énoncé de l'atelier
collaboratif (troisième étude)*

AVATAR (★)

Contexte général

Toute réalité architecturale, n'existe que dans sa relation avec les autres au sein d'un tout qui l'englobe. Cette relation au monde a un sens à la fois statique, ce qui veut dire que toute situation réelle est complexe de fait, et dynamique, ce qui veut dire encore que les relations sont causalement inter-reliés.

Cependant, afin d'avoir une bonne connaissance et donc une bonne compréhension d'un espace, il est également nécessaire d'avoir conscience de son unité spatiale. Cette compréhension de l'espace est essentielle pour permettre à un utilisateur d'avoir une action sur cet espace.

Or notre monde actuel tend vers une pensée duelle, une dématérialisation de l'espace, permettant justement d'aller en sens inverse, de penser dans la dualité, la séparation, la disjonction, la complémentarité, là où les choses ne sont ni séparables, ni disjointes. C'est la vision d'un Avatar.

Sur un plan conceptuel, cette notion ouvre de nouvelles perspectives artistiques, et permet des rapprochements et des approches originales de lieux, et de temps distincts.

Commande :

Dans cette optique, l'association Franco-Belge de promotion des échanges entre les villes de Nancy et de Liège [«association Belgamote»] vous commande un projet para public d'un lieu de rencontre, d'échange, d'événementiel, entre Liège et Nancy.

*« Les parties du monde
ont toutes un tel rapport
et un tel enchaînement
l'une avec l'autre, que je
crois impossible de
connaître l'une sans
l'autre et sans le tout ».*
[Pensées - Pascal]

Lors des entretiens préalables au projet, le maître d'ouvrage a montré la volonté de voir réaliser symboliquement « **un seul bâtiment** » dont le terrain d'assiette serait situé simultanément à Nancy et à Liège. Le bâtiment devra donc avoir une identité

(★) Le mot avatar (du sanskrit « avâtara ») désigne, dans la religion hindoue, chacune des dix incarnations de Vishnou, y compris poisson, tortue, sanglier, Krichna, Bouddha ou encore Kalkî. Depuis la fin du XIX^e siècle, ce mot s'emploie aussi au sens figuré. Cela veut dire que le sens qui dérive des incarnations du dieu hindou est celui de "changement", de "transformation", exprimant des formes diverses d'une seule et unique chose ou personne.

forte et unique. Le maître d'ouvrage est en attente de propositions innovantes et surprenantes sur ce point qui revêt pour lui une grande importance. Cette dualité peut revêtir différents champs lexicaux et porter aux niveaux symboliques, fonctionnels, structurels : symbiose totale, complémentarité, déclinaison, appropriation réciproque, opposition, ...

Acteurs :

L'association Maître de l'Ouvrage étant fondée sur un principe de parité, les représentants de la Ville de Nancy et de la Ville de Liège ont des voies d'égale valeur et seront donc représentés à chaque niveau de décision.

- La représentation de cette association sera incarnée lors de nos séances de travail par M. Jean-Claude Bignon, Professeur à Nancy et M. Pierre Leclercq Professeur à Liège.
- La rédaction du programme est assurée par une agence de 'programmistes – Assistant à la Maîtrise d'Ouvrage' Franco-Belge. Le rôle de cette entité est de guider les équipes de maîtrise d'œuvre au quotidien en faisant écho aux souhaits formulés par le Maître d'ouvrage. La représentation de cet organisme lors de nos séances de travail est assurée, en parallèle à leur rôle d'encadrement pédagogique, par M. Damien Hanser, enseignant à Nancy et Mme. Anne-Michèle Janssen, M. Olivier de Wispelaer et Mme. Sigrid Reiter enseignants à Liège.
- L'infrastructure d'échange asynchrone qui sera utilisée par la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage sera fournie par le Centre de recherche public Henri Tudor. Le centre Tudor sera représenté dans le projet par M. Sylvain Kubicki, ingénieur de recherche.
- L'infrastructure d'échange synchrone sera mise à disposition par le laboratoire LUCID, représenté par M. Arnaud Bonmariage, informaticien.
- La maîtrise d'œuvre sera incarnée par chaque groupe d'étudiants dont la constitution mixte entre Nancy et Liège est définie lors de la première séance de travail, sur base de rôles spécifiques.

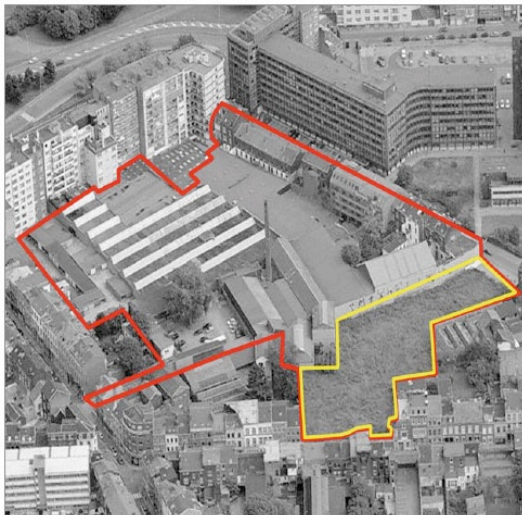
Présentation du site

1. Liège

Dans un quartier en mutation complète, le long de l'esplanade qui sera créée entre la gare TGV et la Meuse, la Ville de Liège souhaite construire un ensemble multifonctionnel du XXI^e Siècle : habiter et travailler en ville, à proximité d'un pôle multimodal majeur, dans un contexte végétalisé et convivial.

Après une période de déclin urbain important, dans les années 1970, la ville de Liège a entamé un réaménagement complet de son centre historique. Elle souhaite à présent étendre cette dynamique aux quartiers péricentraux. La construction de la gare TGV a servi d'impulsion à la création d'un morceau de ville « pour demain ».

Relié au centre historique (+/- 3km) par de grands boulevards créés au XIX^e S, le quartier des Guillemins constitue l'autre extrémité du « Central Business District » de la ville de Liège. Le périmètre Paradis / Blonden / Serbie / XXII est bordé sur 4 côtés d'immeubles (R+2 à R+9) affectés au logement, au commerce et aux services. De grande dimension, cet îlot bâti présente un intérieur sous-utilisé dont les surfaces doivent être consacrées plus densément à l'habitat et aux diverses fonctions urbaines et culturelles parmi lesquelles s'inscrit le projet Belgamote. Ce nouveau quartier privilégiera les modes de déplacement doux et l'intégration d'espaces verts aux espaces bâtis.



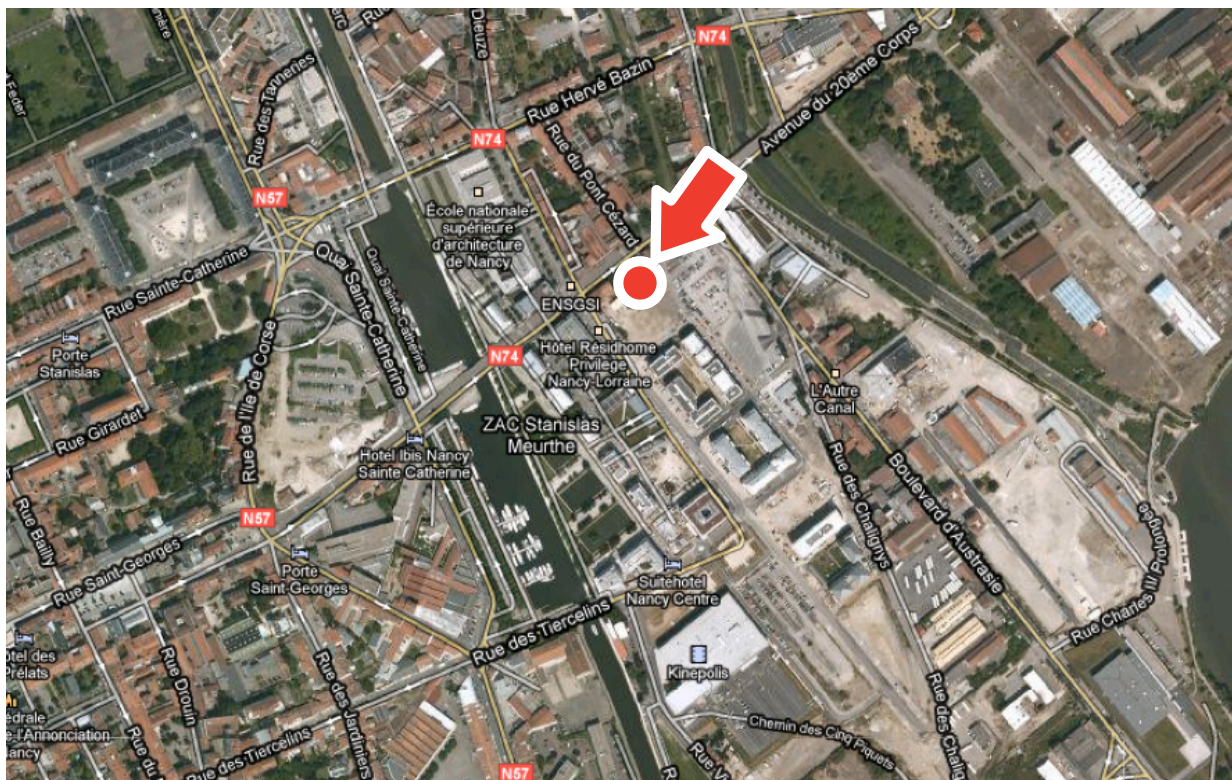
2. Nancy

Contexte

Le site de projet retenu à Nancy se situe dans un quartier à proximité immédiate du centre ville. Issue d'une reconversion urbaine mêlant commerces, enseignement et habitat, la Z.A.C. d'habitat et d'activités Stanislas Meurthe s'étend sur 13 hectares. Démarrée en 1993, la ZAC offre l'opportunité de constituer un quartier attractif, doté de toutes les fonctions urbaines et capable d'enclencher la revitalisation du secteur Meurthe et Canal jusqu'alors constitué d'entrepôts et de bâtiments industriels. Le point de cristallisation de ce nouveau quartier a été créé par la création d'un jardin d'eau, conçu par Alexandre Chémétoff comme un "espace vert architectural" destiné à dialoguer avec l'architecture venant le border. quelques années après le lancement de la Z.A.C. l'attractivité du nouveau quartier a été

augmentée par la création d'une ligne de tramway, l'implantation d'équipements publics dotés d'une image forte, de services et de commerces.

La parcelle retenue par le maître d'ouvrage pour réaliser le projet est un des derniers espaces résiduels situés en plein coeur du quartier, sur l'avenue du XXe Corps. Se situant en bordure de la voie de tramway, à l'angle opposé de la place André Cajelot, la parcelle offre des vues dégagées au Nord et à l'Est et un mitoyen au Sud Ouest. Le Bâti Mitoyen est ancien et en R+2 comme la plupart des bâtiments existants du quartier. Le bâtiments neufs construits dans le plan de Z.A.C. s'étendent quant à eux en R+5.



Données urbanistiques

Référence cadastrale de la parcelle 000 AW 307

Contenance cadastrale 619 mètres carrés

Zone UV du plan local d'urbanisme.

Compte tenu de la localisation et de la position de la parcelle, un alignement sur rue et sur la place est souhaité par la maîtrise d'ouvrage.

Programme architectural

L'association a choisi d'opérer un rapprochement entre les deux villes sous l'angle des technologies avancées de communication et la valorisation technique, économique et artistique qui peut en être faite [sur le plan artistique : «miroirs virtuels» travaux plastiques portant sur la mise en relation de lieux distants par le biais d'écrans projetant des images capturées ailleurs, peintures numériques etc ...]

Le projet construit devra comporter :

- un **espace bar / spectacle polyvalent** permettant l'organisation d'évènementiel entre les 2 sites (spectacles, projets plastiques, projections croisées, ...). cet espace propose un amphi "classique" de 500 places (équipé multi-médias) + 1 espace de bar-scène de 120 places assises. Son caractère modulable et adaptable est un atout important.
- des **salles de travail** louées à la journée ou à l'heure : 3 salles de réunions de 10 personnes fonctionnant en visio-conférence (donc *2, Lg/Nancy) / 5 salles de 3 personnes fonctionnant en BV (donc *2, Lg/Nancy), 1 salle de conférence de 50 places pouvant fonctionner en visioconférence et 2 salles de cours de 20 places avec un mur interactif. Les salles peuvent être déclinées selon les demandes afin de laisser la porte ouverte à d'autres activités.
- Un ensemble de bureaux **pour le personnel** (un bureau de direction, un bureau de technicien/régisseur), un local de repos pour l'équipe d'accueil et du bar. **La banque d'accueil** des 'locataires' devra pouvoir fonctionner en horaires décalés sur les deux sites (une hôtesse de permanence à Nancy pourrait accueillir les gens à Liège par exemple).
- un **espace d'exposition** réparti sur les deux sites (min 100m2).
- des **espaces de stockage** en rapport avec la partie bar / exposition et espaces d'accueil.
- les annexes, services, locaux techniques et dégagements nécessaires pour un tel équipement avec au minimum 1 local ménage par étage, 1 local de stockage pour chaque salle de travail (10% minimum de sa surface utile).
- D'une manière générale le projet devra avoir une grande qualité environnementale et une bonne performance énergétique.
- Chaque proposition de bâtiment devra en outre prendre en compte les réglementations d'**accessibilité** et de **sécurité** en vigueur dans chacune des deux villes.

Modalités de travail

Le projet abordé à l'occasion de ce cours constitue une expérience originale, alliant approche coopérative et environnementale dans le cadre d'un projet innovant et ambitieux.

Ainsi, la problématique environnementale est « naturellement » à la base de la démarche de conception, le bâtiment devant être clairement interprété comme un signal fort manifestant le volontarisme et l'engagement du respect de l'environnement. Ce travail de conception architecturale constitue une expérimentation de conception coopérative distante au sein d'équipes mixtes Nancy/Liège. Les étudiants doivent par conséquent porter une attention particulière à l'organisation du travail et à l'utilisation des outils informatiques permettant cette coopération.

Scénario de travail

- chaque groupe travaille indépendamment sur son projet.
 - la spécialisation au sein des équipes (HQE, Structure, architecture de l'enveloppe, ambiances, architecture intérieure, pilotage de projet ...) est à préciser lors de la constitution des équipes (rôles).
 - chaque équipe utilise la plateforme de collaboration asynchrone 'CRTI-Web' pour échanger ses documents, définir ses tâches, discuter et valider les phases de travail. Durant les réunions synchrones, le Bureau Virtuel est utilisé pour la production des esquisses communes et la revue de projet.
 - le rendu est organisé en phases de validation correspondant aux définitions ESQUISSE et APS : à ces phases correspondent les évaluations intermédiaire et finale par les enseignants représentant la maîtrise d'ouvrage.
 - Les documents utiles pour chaque séance de travail sur le bureau virtuel doivent être déposés sur le serveur CRTI-Web.
 - Chaque séance de travail étant limitée en temps, elle fera l'objet d'un ordre du jour et d'un compte rendu rédigé par un membre désigné dans l'équipe de projet et posté sur le serveur au plus tard la veille de la séance pour l'ordre du jour et le lendemain pour le compte rendu (ce points feront l'objet d'une évaluation par les enseignants représentant la maîtrise d'ouvrage).
- les critères d'évaluation sont : **projet architectural 50%** – **respect du protocole de collaboration** (et innovation) **50%**.

Composition des équipes

6 équipes mixtes (Liège/Nancy)

Liste des livrables attendus

Au démarrage du projet :

Dès réception de l'énoncé et analyse du cadre bâti et environnemental, il est important de définir une ligne directrice de projet. Celle-ci constituera le concept générateur, non seulement pour guider l'équipe de projet tout au long de la conception, mais aussi pour pouvoir fédérer autour d'une idée commune. Il est important que celle-ci soit conçue en étroite collaboration et comprise parfaitement par tous les membres de l'équipe.

Il est ainsi demandé qu'au terme de la première réunion de travail commune, un texte d'une quinzaine de ligne soit produit en reprenant :

- un nom, logo ou titre signifiant votre intention et résumant votre concept
- une description des objectifs à atteindre en termes de performance, de fonctionnalité, de qualité d'ambiance, ...
- une ébauche de votre méthodologie de travail commun

Lors de la rencontre avec le MO :

Si une séance de travail commun doit s'organiser autour d'un ordre du jour, une rencontre avec votre Maître de l'Ouvrage est l'occasion de faire le point de manière plus précise sur votre état d'avancement.

À ce stade, nous vous demandons de préparer dans le cadre de vos rapports de réunion un point spécifique précisant non seulement les points rencontrés mais identifiant aussi les éléments restants à gérer. De plus, il est important de se

positionner par rapport aux demandes initiales du Maître de l'Ouvrage afin de lui soumettre toute évolution éventuelle.

Au stade esquisse (rendu intermédiaire) :

À ce stade, il s'agit de faire le point sur l'avancement des projets, il est important de transmettre les idées véhiculées et la manière dont l'équipe s'est approprié le programme : il n'est en AUCUN CAS opportun de faire appel à des images de synthèse et des rendus de type 'concours'.

- un ensemble d'éléments de type 'croquis' faisant état du parti architectural retenu par l'équipe.
- une analyse du contexte urbain et un positionnement clair de l'équipe par rapport aux enjeux locaux identifiés.
- une présentation des concepts architecturaux qui guideront le projet par le biais de maquettes d'étude (carton, Sketchup ou équivalent), de références, d'échantillons, d'organigrammes.
- aucun plan de type 'exécution' ou images de synthèse photo-réaliste ne sont attendus lors de ce rendu.

Au stade du projet (rendu final) :

À ce stade le projet est considéré en stade APS, il est demandé aux équipes de présenter leur projet sous la forme suivante :

- 1.l'ensemble des plans, coupes, élévations et études d'ingénierie nécessaires pour rendre compte de la pertinence du projet. Le niveau de détail requis pour cette étape correspond à des plans au 1/200e pour les plans de bâtiment, 1/50e pour les plans de détail des bureaux et des espaces particuliers et 1/500e pour les plans d'aménagement urbain.
- 2.une insertion 3D dans le site montrant l'équipement et son insertion dans son environnement.
- 3.un argumentaire et l'ensemble des croquis jugés nécessaires par l'équipe pour étayer leur projet.
- 4.un **compte-rendu** critique de l'expérience coopérative vécue par chaque groupe de projet, notamment en termes de partage des rôles, de l'utilisation du serveur de documents dédié et du bureau virtuel, présenté oralement lors de la présentation en groupe.
- 5.une présentation orale soutenue par un diaporama, de 30 minutes maximum.

Points particuliers, règles locales :

- [Na] Individuellement : un retour critique et analytique sur les formes de collaboration/coopération identifiées lors du déroulement du SDC. La restitution sera réalisée sous la forme d'un rapport de 2 à 4 pages à rendre le jour du rendu final à la fin de la journée de rendu.
- [Na] Une planche A0 servira de support le jour du rendu final et sera remise à l'équipe enseignante.
- [Lg] La copie du diaporama final sera rendue avec des annotations reprenant le contenu de l'exposé.
- [Lg] Dans le cadre du cours de Mme Reiter " Conception environnementale des bâtiments ", l'évaluation du TP SDC4 (défense orale relative à la démarche HQE) comptera pour 50% de la note totale, les autres 50% proviendront d'un examen portant sur les matières vues en cours (aucun document supplémentaire n'est demandé dans le cadre du SDC4)

Annexe 3 : grille d'analyse de la collaboration

Fluidité de la collaboration : Permet d'évaluer la coordination des communications et des actions des collaborateurs.

Indicateurs	Questions positives	Questions négatives
Gérer les tours de parole Modalités dominantes ? _ verbale _ gestuelle _ visuelle	Fluidité des tours de parole par des regards, gestes ou de manière verbale ? OUI OUI/NON NON	Chevaucher le tour de parole de son/ses collaborateur/s ? OUI OUI/NON NON
Gérer l'utilisation d'outils de travail (stylet, les menus) Modalités dominantes ? _ verbale _ visuelle _ gestuelle	Monitoring et fluidité dans l'utilisation des outils par des communications selon un mode verbal, visuel ou gestuel ? OUI OUI/NON NON	Incompréhension de qui a la main pour l'utilisation d'outils ou présence d'interférence dans l'utilisation d'outils de son/ses collaborateur/s ? OUI OUI/NON NON
Maintenir l'orientation de son attention en phase avec celle de son/ses collaborateur/s Modalités dominantes ? _ verbale _ gestuelle _ graphique _ visuelle	Cohérence de l'objet de la focalisation de l'attention des collaborateurs observable grâce à des indices verbaux, gestuels, graphiques, visuels ? OUI OUI/NON NON	Ne pas réparer une erreur de focalisation d'attention ou erreur de focalisation d'attention sur une durée assez longue ? OUI OUI/NON NON
Note finale : 1 2 (pas bon)	3 4 5 (très bon)	OUI OUI/NON NON

Soutenir une compréhension mutuelle : Permet d'évaluer si les collaborateurs ont une base de référence commune concernant les concepts évoqués du problème et des solutions, les actions commises et l'état du dispositif.

<p>Susciter et donner des feedbacks sur la compréhension de l'état du problème/solution</p> <p>Modalités dominantes ?</p> <ul style="list-style-type: none"> _ verbale _ gestuelle _ graphique 	<p>Questionner, clarifier, donner des compléments d'information et backchannels verbaux et comportementaux sur l'état du problème/solution ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Absence de correction spontanée de l'incompréhension de l'état du problème/solution pendant une durée assez longue ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Susciter et donner des feedbacks sur les actions en cours ou ultérieures</p> <p>Modalités dominantes ?</p> <ul style="list-style-type: none"> _ verbale _ gestuelle _ graphique _ visuelle 	<p>Questionner, clarifier, donner des compléments d'information et backchannels verbaux et comportementaux sur les actions en cours ou ultérieures ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Incompréhension sur les actions de son/ses partenaire/s pendant une durée assez longue ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Susciter et donner des feedbacks sur l'état actuel du dispositif (fonctions actives et état des documents ouverts)</p> <p>Modalités dominantes ?</p> <ul style="list-style-type: none"> _ verbale _ gestuelle _ graphique _ visuelle 	<p>Questionner, clarifier, donner des compléments d'information et backchannels verbaux et comportementaux sur l'état du dispositif ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Incompréhension sur l'état du dispositif pendant une durée assez longue ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Note finale : 1 2 3 4 5 (pas bon) (très bon)</p>		

Echange d'informations pour la résolution du problème : permet d'évaluer les échanges des informations et leurs explications à son/ses collaborateurs pour la réalisation de l'activité de conception.

<p>Génération d'idées pour la conception Modalités dominantes ? _ verbale _ graphique _ gestuelle</p>	<p>Proposer/susciter différentes idées (problèmes, solutions, cas passés, contraintes) pour la conception selon modes verbal, graphique ou gestuel ?</p>	<p>Se fixer sur une seule idée pour la conception sans explorer/proposer d'autres possibilités ?</p>
<p>Approfondissement d'une/des idée/s Modalités dominantes ? _ verbale _ graphique _ gestuelle</p>	<p>Développer des idées en les détaillant selon modes verbal, graphique ou gestuel ?</p>	<p>Ne pas approfondir au moins une idée ?</p>
<p>Cohérence/suivi des idées</p>	<p>Echanger des idées avec son/ses collaborateur/s en cohérence avec le problème de conception et les idées émises précédemment ?</p>	<p>Avancer une/des idée/s sans lien avec les échanges précédents et/ou avec le problème de conception ?</p>
<p>Note finale : 1 (pas bon)</p>	<p>2 3 4 5 (très bon)</p>	<p>OUI OUI/NON NON OUI OUI/NON NON OUI OUI/NON NON</p>

Processus de travail et gestion du temps : Permet d'évaluer la planification à long et court terme et la gestion des contraintes temporelles.

<p>Etablir un plan de travail Modalités dominantes ? _ verbale _ textuelle _ graphique</p>	<p>Gestion et planification à long et court terme pour l'ensemble de l'activité ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Mise en œuvre de l'activité et des sous-tâches de manière aléatoire ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Diviser l'activité de conception en sous-tâches Modalités dominantes ? _ verbale _ textuelle _ graphique</p>	<p>Division de l'activité de conception en sous-tâches et éventuellement hiérarchisation et identification des interdépendances entre les sous-tâches ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Absence de division de l'activité de conception en sous-tâches et présence d'aller-retour pour gérer les interdépendances de certaines sous-tâches ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Distribuer et gérer les divisions Modalités dominantes ? _ verbale _ gestuelle _ graphique</p>	<p>Distribution des sous-tâches de conception entre collaborateurs (selon leur nature, les ressources et compétences de chacun) pour des apports simultanés et gestion de la mise en commun des apports mutuels ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Désorganisation ou absence de la distribution des sous-tâches de conception et de la mise en commun des apports mutuels ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Gérer le temps Modalités dominantes ? _ verbale _ visuelle</p>	<p>Référence au temps et éventuellement compromis entre tâches et temps selon les plans à court et long terme ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>	<p>Absence de prise en compte du temps pour l'exécution des plans à court et long terme ?</p> <p>OUI OUI/NON NON</p>
<p>Note finale : 1 2 3 4 5 (pas bon) (très bon)</p>		

Orientation coopérative : Permet d'évaluer l'équilibre des contributions dans la collaboration.

Etablir des rapports équilibrés	Contributions verbales égales entre collaborateurs ?	Monopolisation de la parole par un collaborateur ?
OUI	OUI/NON NON	OUI OUI/NON NON
Contributions égales entre collaborateurs quant à l'utilisation des outils (graphique) ?		Monopolisation de l'utilisation des outils (graphique) par un collaborateur ?
OUI	OUI/NON NON	OUI OUI/NON NON
Contributions égales entre collaborateurs sur l'organisation de la planification du travail ?		Monopolisation de l'organisation de la planification du travail par un collaborateur ?
OUI	OUI/NON NON	OUI OUI/NON NON
Contributions égales entre collaborateurs sur les choix de conception ?		Monopolisation des choix de conception par un collaborateur ?
OUI	OUI/NON NON	OUI OUI/NON NON
Note finale : 1 (pas bon)	2 4	3 5 (très bon)

RESUME

Cette thèse s'intéresse aux modalités de construction des représentations externes dans les activités cognitives complexes, en particulier des représentations graphiques : les schémas explicatifs, les annotations de documents ou les croquis permettent en effet de formuler des idées, de synthétiser de l'information, de communiquer et de raisonner. Ce travail cherche à comprendre en profondeur les processus mis en jeu lors de l'expression graphique, et l'impact des supports de représentation sur cette activité.

A cette fin, il interroge le concept original d'esquisse numérique dans le champ de la conception architecturale. Ce concept vise à permettre à l'architecte de dessiner à main levée, de la même manière qu'avec ses outils traditionnels, mais dans un environnement entièrement informatisé. L'idée est ainsi de tirer profit de la facilité d'utilisation du stylo, tout en exploitant les capacités de simulation ou de représentation du support numérique. Le croquis à main levée est en effet reconnu comme un outil essentiel de la conception : grâce à sa fluidité, à son immédiateté et à la liberté qu'il autorise, il soutient efficacement les phases créatives de l'idéation. Il est aussi un outil puissant d'annotation de document en conception collaborative et en revue de projet.

Ce travail analyse l'intérêt et l'apport de l'esquisse numérique dans la conception architecturale, mais aussi les contraintes qu'elle véhicule en tant qu'instrument de la pensée individuelle et collective. Il cherche également à identifier l'impact du mode d'interaction que constitue le stylo électronique sur l'activité graphique et cognitive en tâche de conception.

Cette thèse repose sur trois études empiriques inédites, relatives à l'utilisation d'environnements d'esquisses numériques développés à l'ULg. Elle décrit les logiques d'externalisation, compare les caractéristiques graphiques des esquisses numériques et traditionnelles, identifie les fonctions cognitives des transformations de représentations et explicite le rôle de la modalité graphique en conception collaborative à distance.

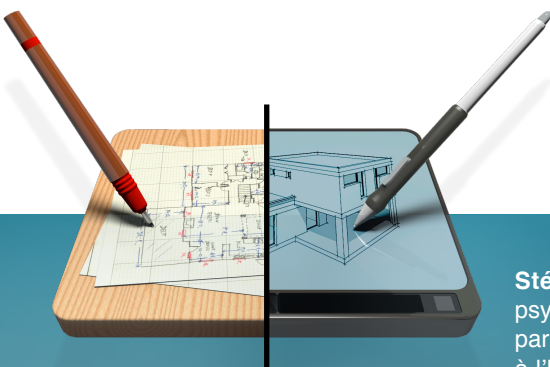
ABSTRACT

This thesis investigates the modalities of creating external representations in complex cognitive activities, especially graphical representations: the explanatory diagrams, annotations of documents or drawings make it possible to formulate ideas, to synthesize information, to communicate and to reason. This work seeks to understand in depth the processes involved in graphic expression, and the impact of representation supports on this activity.

For this purpose, it addresses the original concept of digital sketch in the field of architectural design. This concept aims to allow the architect to draw freehand sketches, in an entirely digital environment, but in a «natural» way, as with its traditional tools. The idea is to take advantage of the ease of use of the pen, while exploiting the capabilities of simulation or representation of the digital medium. The freehand sketch is indeed known as an essential tool for the design: thanks to its fluidity, its immediacy and the freedom it allows, it supports efficiently the creative phases of ideation. It is also a powerful tool for document annotation in collaborative design and project review.

This work analyzes the interest and the contribution of digital sketching in architectural design, but also stresses the constraints it vehicles as an instrument of individual and collective thought. It also seeks to identify the impact of electronic pen as a mode of interaction on the cognitive and graphical activities in design tasks.

This thesis is based on three original empirical studies on the use of digital sketching environments. It describes the logic of graphical externalization, compares the characteristics of digital and traditional sketches, identifies the cognitive functions of representations transformations and makes explicit the role of the graphical modality in collaborative remote design.



UNIVERSITE DE LIEGE
Octobre 2011

Stéphane Safin diplômé en psychologie, orientation ergonomie et psychologie du travail de l'ULg en 2003. En 2006, il complète sa formation par un diplôme d'études approfondies en sciences psychologiques, toujours à l'Université de Liège. Dès 2004, il collabore avec le laboratoire d'ingénierie de la conception LUCID-ULg, d'abord comme chercheur détaché de la faculté de Psychologie et des Sciences de l'Education, puis devient en 2007 chercheur au LUCID-ULg, à la faculté des Sciences Appliquées. Il est en charge de la gestion des approches centrées utilisateurs dans les processus de développement de nombreux projets appliqués à la conception architecturale. Depuis 2009, il y pilote des projets R&D dans le domaine du *Design Cognition* et de l'ergonomie cognitive.