

De l'idéation au BIM – Identification et caractérisation des informations utiles en phase préliminaire de conception

Gaëlle Baudoux^{1*}, Émilie Vanhove¹, Samia Ben Rajeb², and Pierre Leclercq¹

¹Lucid-ULiège – 9 Allée de la découverte, B4000 Liège, Belgique

²BATir – 50 Avenue Franklin Roosevelt, B1050 Brussels, Belgique

Abstract. Cet article interroge les écosystèmes numériques dans le cadre de pratiques BIM (Building Information Modeling) et vise à faire évoluer l'usage de ces systèmes de partage et de gestion de l'information. Des études de l'implication de ces méthodes numériques dans la conception architecturale mettent en évidence l'inadéquation du BIM avec les activités de conception notamment dans la gestion des informations. L'article aborde alors la question de la spécification des composants du projet et de la caractérisation des informations utiles aux concepteurs en phase d'idéation et de conception sommaire. L'étude d'une capsule de conception permet de caractériser les informations à ce jour peu présentes dans les maquettes BIM mais essentielles pour ancrer la conception. En outre, des activités de rappels d'attributs du projet sont identifiées et leurs rôles dans l'activité de conception sont synthétisés.

Mots-clés. BIM, Transition numérique, Conception collaborative, Attributs du projet.

Abstract. This article explores digital ecosystems within the framework of BIM (Building Information Modeling) practices and aims at improving the use of these information sharing and management systems. Since studies on the involvement of these digital methods in architectural design have highlighted the inadequacy between BIM and design activities, the article addresses the issue of the specification of the building's components and the characterization of the information useful to the designers in the ideation and rough design phase. The study of a design capsule characterizes the information rarely present in BIM models but essential to design. In addition, project's attributes reminders and their roles are identified and their roles in the design activity are synthesized.

Keywords. BIM, Digital Transition, Collaborative Design, Building Attributes.

* Corresponding author: gbaudoux@doct.uliege.be

1 Introduction

Plusieurs auteurs s'accordent à dire que le BIM constitue une démarche utile en phase de construction, visant à regrouper dans une maquette numérique 3D partagée toute l'information bâtiment (graphique comme non-graphique) issue des phases d'idéation de conception et de construction [1, 2]. Le BIM appelle donc à des informations précises spécifiant le bâtiment de manière la plus exhaustive possible, ce qui est difficilement compatible avec les esquisses architecturales accentuant les intentions du projets et ses lignes directrices. De nombreux auteurs s'accordent sur l'inadéquation de l'informatique à l'idéation [3, 4] et le BIM ne fait pas exception, demeurant difficilement transposable [5] dans les activités d'idéation qui ont pour objectif la génération et le déploiement des idées [6], ou dans les phases de conception, nécessairement itératives [7]. Cet outil, comme d'autres outils de modélisation 3D, requiert en effet des techniques de saisie des données en inadéquation avec les activités des premières phases créatives, tant en terme de cognition que de paradigmes d'interaction [8]. Des observations montrent par ailleurs que la transition entre la conception architecturale et le BIM s'accompagne d'une perte d'information, notamment des informations relatives aux ambiances, aux espaces ou encore aux motivations des décisions architecturales [9, 10, 11].

Face à cette inadéquation d'activités et à cette perte d'information, se pose la question de la gestion des informations en cherchant à identifier et caractériser, parmi les très nombreux attributs du projet architectural conçu, ceux qui constitueront des informations utiles à intégrer dans la maquette BIM des phases suivantes. Dans le cadre de nos recherches, nous nommons « attributs du projet architectural » ou « attributs », toute caractéristique décrivant le projet, le bâtiment ou une raison de choix de conception. A titre d'exemple, si les architectes conçoivent l'entrée principale d'un bâtiment, les attributs peuvent être la position de l'ouverture de porte dans la façade, la forme de l'allée menant à la porte, la trajectoire du flux de visiteurs empruntant cette porte, la largeur de passage fixée pour satisfaire les normes incendies, ... Ces attributs retenus devront être utiles pour la suite de la démarche BIM mais aussi, et surtout, pour la suite du processus de conception.

Pour ce faire, notre article est structuré en trois grands points : un bref état de l'art, suivi d'un descriptif de notre cadre de recherche et du protocole utilisé puis, finalement, la présentation de nos résultats et leur discussion.

2 Le BIM comme outil de gestion des informations

Le BIM en tant qu'outil a déjà été largement étudié. Certains auteurs ont explicité ce qu'est le BIM et la démarche BIM associée [1, 2, 12]. D'autres ont analysé son opérabilité et ont cherché à proposer des méthodes d'usage de cet outil [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Plusieurs travers de la démarche BIM ont été identifiés par Mer [10], Sanchez (2017) et Migilinskas [18]. Rahhal [11] et Calixte [19] ont, quant à elles, observé des pratiques BIM sur le terrain pour identifier les usages réels de cet outil. La question de l'implémentation et de l'intégration de ces nouvelles pratiques numériques a également été abordée, notamment par Migilinskas [18], le LIST [13], Boton et Forgues [20], et Hoscheid [21]. D'autres auteurs, comme Dautremont *et al.* [5] et Rahhal [11] ont récemment étudié la gestion des informations mais plutôt dans les phases d'avant-projet détaillé et de chantier. La gestion de l'information dans les phases d'idéation et de conception sommaire s'avère encore peu étudiée. Or, le concepteur a besoin garder, tout au long du processus, une trace des étapes de conception parcourues, depuis l'énoncé du problème jusqu'au choix de la solution [22].

3 Problématique

Suite au besoin de traçabilité mis en évidence et au vu de l'inadéquation du BIM avec les activités de conception, cet article tente d'identifier et de caractériser les informations utiles aux concepteurs en phase d'idéation et de conception sommaire.

Nous posons l'hypothèse qu'au travers des activités de conception, le rappel ou le référencement à un attribut du bâtiment préalablement conçu traduirait le caractère utile de cette information rappelée et serait le signe du besoin de l'ancrer dans un soucis de traçabilité.

Nos questions de recherche sont donc les suivantes : Quels types d'attribut font l'objet de rappels ? Quels rôles jouent les différentes natures de rappel dans la conception ? A quel(s) moment(s) du processus de conception ces rappels ont-ils lieu ?

4 Méthodologie

Le *design monitoring* permet d'observer de manière empirique un processus de conception et les activités cognitives des concepteurs. Plusieurs méthodes existent. Schön opte pour l'analyse de protocoles verbaux et des actions des participants, segmentant et codant ainsi les verbalisations et les actions des concepteurs [23]. La linkographie de Goldschmidt [24] consiste à décomposer le processus en *design moves* et à caractériser les liens entre ces transformations du projet, créant une représentation graphique de l'activité de conception.

Notre méthodologie dans cette étude, s'attache à caractériser l'action elle-même ainsi que ses déterminants et ses déclencheurs. Elle se rapproche ainsi des principes de la linkographie.

5 Protocole

Notre expérience prend place dans le cadre de recherche de l'APC, cours d'Analyse des Processus de Conception donné à l'Université de Liège. Nous avons choisi d'intégrer ce cadre pour mener notre expérimentation car il permet d'analyser une « capsule » de conception. Contrairement à un processus long et séquencé sur plusieurs sessions, cette modalité évite les pertes d'information et permet de revenir, dans l'analyse, sur les raisons d'action sans qu'elles aient été édulcorées par le temps. Notons que cette capsule représentant les premières phases d'idéation, les outils BIM ne sont pas intégrés à cette étape du processus de conception.

Le protocole scientifique utilisé dans cette étude a été précédemment développé et est utilisé depuis plusieurs années. Il est défini de manière à fournir aux étudiants le cadre et les outils théoriques et méthodologiques nécessaires pour analyser un processus de conception collaborative. Largement détaillé par ailleurs [25, 26, 27], ce protocole comprend la mise en place d'une capsule de conception pour trois sujets concepteurs qui disposent de 120 minutes et de tous les outils traditionnels non numériques pour réaliser l'aménagement d'un magasin d'optique, accueillant un espace d'atelier et un espace de vente. Le protocole prévoit plusieurs missions d'observation et propose les grilles d'observation adaptées à ces missions, ainsi que les grilles de codage permettant d'analyser le processus au travers notamment des représentations, de l'abstraction de l'objet, des activités collectives et des analogies faites. La figure 1 illustre la session de conception et les grilles d'observation.



Fig. 1. Session de conception et cartes de mission (Cours d'APC 2022).

A ce protocole préexistant, nous intégrons aussi de nouvelles missions d'observation et grilles de retranscription et de codage, en alignement avec nos objectifs et les questions de recherche posées dans le cadre de cet article. Notons que cet ajout au protocole existant a fait l'objet d'une expérience 0 sur base d'une capsule de conception d'une année antérieure.

Cette nouvelle mission d'observation consiste à relever, tout au long du processus, les rappels fait d'attributs du projet conçu auparavant dans le processus de conception. Pour chaque rappel, nous indiquons (figure 2) le temps auquel il a lieu. Nous décrivons le rappel, l'attribut faisant l'objet du rappel et les concepteurs impliqués. Par exemple, *le sujet A rappelle au sujet B que la vitrine est visible depuis la façade, derrière les grandes baies vitrées*. Nous inscrivons également le focus et le document sur lesquels avait lieu la conception au moment du rappel. Par exemple, *conception de la façade sur le plan du Rez-de-Chaussée*. Finalement, nous classifions le type d'attribut faisant l'objet du rappel parmi trois catégories (« Formel », « Fonctionnel » et « Aspects techniques »), auxquelles nous ajoutons une catégorie « Autre ». Ces trois catégories sont tout d'abord généralistes pour permettre une prise de notes instantanée en séance. Elles seront par la suite détaillées en les subdivisant.

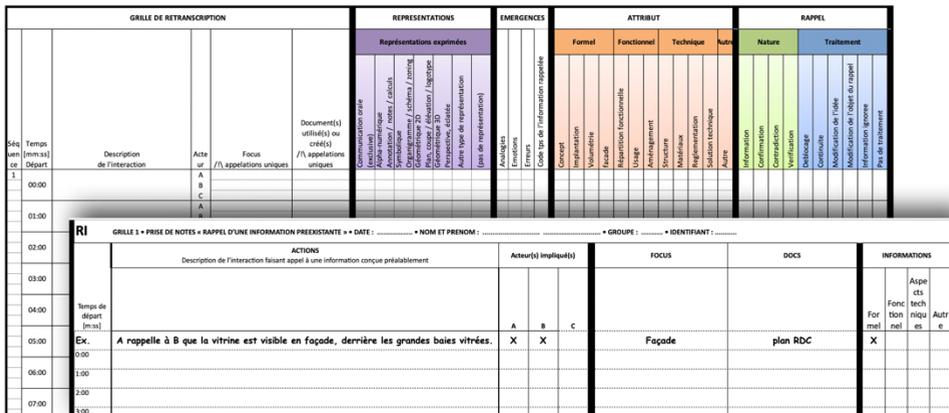


Fig. 2. Grille d'observation des rappels, ajoutée au protocole existant.

La « capsule » de conception est en outre filmée (son et image) et enregistrée. Le codage est ensuite réalisé dans le logiciel Excel et reprend au niveau des colonnes le code temps des différents rappels, une description textuelle pour mémoire, la classification en typologie de l'attribut rappelé, la nature du rappel et le traitement qui est fait du rappel par les concepteurs. Précisons que l'observation et le codage sont menés en double aveugle sur

base des enregistrements vidéo des deux heures de conception. Au terme de ce double codage, les grilles s'avèrent assez similaires pour valider les données recueillies.

6 Modalités de codage

Définissons ici précisément les différentes typologies d'attribut, ainsi que les natures des rappels et les traitements possibles suite à ces rappels.

Les attributs sont d'abord classés en trois catégories : Formel, Fonctionnel et Technique. Cette catégorisation a été développée dans une précédente publication [29]. Elles sont détaillées en 11 sous-catégories, en table 1.

Table 1. Typologie d'attribut.

Formel	Fonctionnel	Technique
concept	répartition fonctionnelle	structure
implantation	usage(s)	matériaux
volumétrie	aménagement	réglementation
façade		solution technique
Autre		

Nous considérons et codons ensuite, comme un rappel d'attribut, toute intervention verbale d'un acteur rappelant explicitement, à lui-même ou aux autres acteurs, un attribut du projet déjà présent ou évoqué auparavant dans le processus de conception.

De manière à étudier le rôle de ces rappels dans les activités de conception, nous définissons dans le tableau 2, préalablement à nos observations, les natures de rappel et les traitements possible suites à ce rappel.

Table 2. Natures et traitements de rappel.

Nature	Traitement
information <i>Rappel visant à informer d'un élément.</i>	déblocage <i>Le rappel entraîne un déblocage d'une situation bloquant la conception</i>
contradiction <i>Rappel visant à mettre en évidence une contradiction entre une nouvelle idée et un élément précédent.</i>	continuité de l'action <i>Le rappel sert l'action en cours, sans la modifier.</i>
confirmation <i>Rappel visant à demander confirmation d'une compréhension.</i>	modification de l'idée <i>Suite à une invalidation, le rappel entraîne une modification de l'attribut en cours de conception.</i>
vérification <i>Rappel visant à vérifier que le programme et les contraintes sont respectés.</i>	modification de l'objet du rappel <i>Suite à une invalidation, le rappel entraîne une modification de l'attribut rappelé.</i>
	ignorance <i>L'intervention verbale que constitue le rappel est ignorée.</i>
	pas de traitement <i>Le rappel est inopportun et donc n'impacte pas la conception.</i>
autre	autre

7 Résultats

7.1 Données recueillies

A la suite du codage d'une première équipe de conception, 47 rappels ont été identifiés pour 120 minutes de conception découpées en 6 séquences. Nous obtenons ainsi des données couvrant :

- la répartition des typologies d'attribut faisant l'objet de rappels pour chaque séquence du processus observé;
- les proportions d'usage de chaque nature de rappel et les moments du processus auxquels ils surviennent;
- et les proportions d'apparition des différents traitements possibles des rappels avec les moments du processus auxquels ils apparaissent.

Ces données sont visualisées au moyen du logiciel de visualisation de données nommé CommonTools [26] qui permet de générer plusieurs types de graphes, en particulier des lignes temporelles. Les données présentées ci-dessous sont celles de la première équipe étudiée. Les analyses ont ensuite été menées sur une deuxième équipe de conception, selon le même protocole, et les résultats convergent.

7.2 Typologie d'attribut faisant l'objet de rappel

En analysant les types d'attribut faisant l'objet de rappel, nous constatons qu'ils varient en fonction des séquences du processus observées (figure 3).

Ce sont tout d'abord des attributs de répartition fonctionnelle et de solutions techniques qui sont rappelés lors de la séquence de zonage. Puis apparaissent des rappels concernant la volumétrie et l'aménagement dans la phase d'idéation. Les rappels au sujet de la répartition fonctionnelle diminuent en termes d'occurrence quand arrive la séquence de concrétisation de la conception. Ils laissent alors place à des rappels plus précis au sujet de l'aménagement, des usages et des façades. Enfin, lors de la phase de conception, la répartition fonctionnelle ne fait plus l'objet de rappels. Par contre de nouveaux types apparaissent concernant notamment le concept (conception de l'enseigne) et la réglementation (vérification des normes PMR).

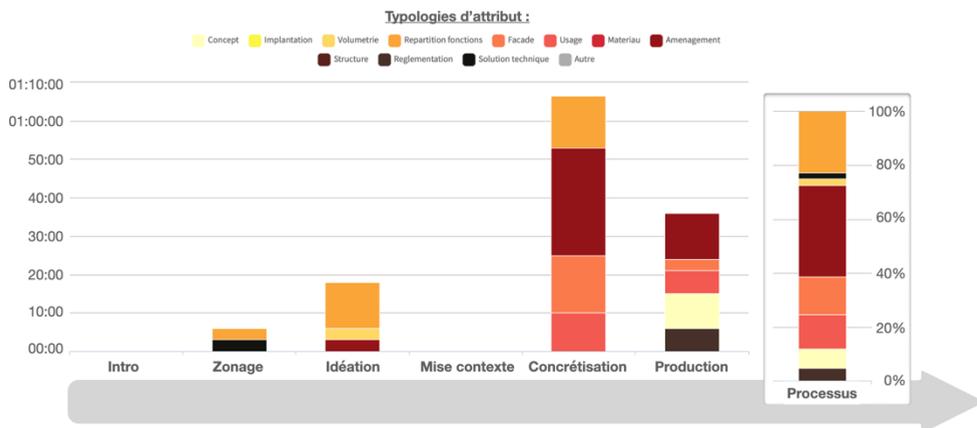


Fig. 3. Distribution et proportion des types d'attribut rappelés tout au long du processus (équipe 1).

Nous remarquons dès lors qu'au cours du processus, les thèmes des rappels vont des plus généraux, comme la répartition fonctionnelle, vers les plus précis, comme l'aménagement ou les façades. Ensuite, nous pouvons remarquer que, sur la totalité du processus, certains attributs font très souvent l'objet de rappels. L'aménagement représente un peu plus d'1/3 des rappels, et la répartition fonctionnelle en représente 1/4. Les attributs « structure », « implantation » et « matériaux », par contre, ne sont jamais rappelés.

7.3 Natures et traitements des rappels

Les rappels informatifs, en jaune sur la figure 4, sont prépondérants, représentant plus de 60% du total des rappels formulés lors du processus de conception. La contradiction, assez récurrente également, représente ensuite 20% des rappels.

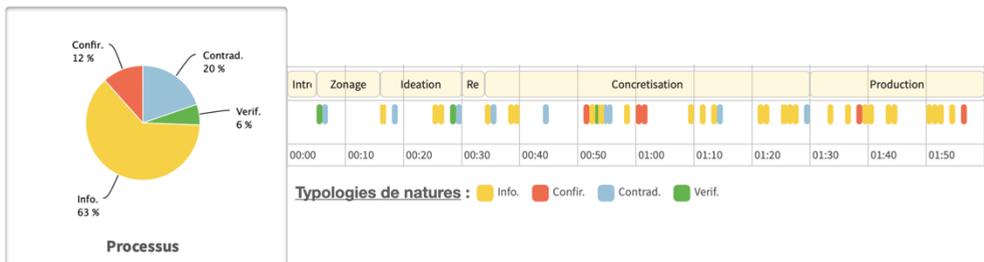


Fig. 4. Distribution et proportion des natures de rappels (équipe 1).

Pour les traitements possibles des rappels, c'est le déblocage qui apparaît le plus souvent, suivi de la continuité et de la modification de l'idée (figure 5).

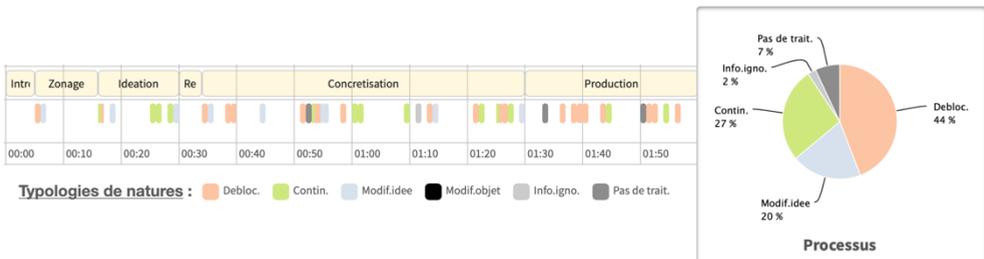


Fig. 5. Distribution et proportion des traitements de rappels possibles (équipe 1).

Par ailleurs, en termes de répartition temporelle, si nous regardons toute nature et tout traitement confondu, les rappels sont effectués de manière plutôt homogène tout au long du processus. Nous n'identifions pas de concentration sur une séquence préférentielle.

Par contre, en regardant les moments d'apparition en fonction de la nature (figure 4), nous pouvons observer que les rappels de vérification (en vert) sont propres aux étapes de zonage et d'idéation, en début de processus. Par exemple lorsque les concepteurs relisent le programme pour vérifier que toutes les fonctions demandées sont présentes. En opposition, la confirmation (en rouge) est propre aux étapes de concrétisation du projet et de production, en fin de processus. Par exemple lorsqu'un concepteur demande confirmation que les traits dessinés représentent bien un cloison, lors de la mise au net des plans. Les rappels visant à informer (en jaune) et à invalider (en bleu) sont, quant à eux, présents tout au long de la conception. Par exemple, pour informer d'une erreur constatée ou pour rappeler une décision préalable d'aménagement.

Finalement, lorsque nous croisons la nature des rappels (en ordonnée, cf. Figure 6) avec le traitement de ces rappels (en abscisse), nous obtenons, des valeurs représentant le nombre d'occurrences moyennes pour tous les acteurs. Nous pouvons ainsi observer un lien

entre la nature des rappels et le traitement de ceux-ci par les concepteurs. Plus la couleur est foncée et plus le nombre d'occurrences est élevé. Le rappel étant formulé par un concepteur à un moment de la conception dans un but défini, ce croisement laisse apparaître des rôles spécifiques pour ces rappels, qui seront discutés dans la section suivante.

	Debloc.	Contin.	Modif. Idée	Modif. Objet	Ignorance	Pas de trait.
Information	5.67	3	0	0	0.33	1
Continuité	1	0.67	0	0	0	0
Contradiction	0	0	3	0	0	0
Vérification	0.33	0.67	0	0	0	0

Processus

Fig. 6. Proportions et moments d'apparition des différents traitements des rappels (équipe 1).

8 Discussion

8.1 Typologie d'attribut faisant l'objet de rappel

Comme nous l'avons vu dans la section 7.2, les attributs de type « répartition fonctionnelle » et « aménagement » font majoritairement l'objet de rappels, tandis que ceux de type « structure », « implantation » et « matériaux » n'ont jamais été rappelés dans cette capsule de conception.

Nos grilles d'observation montrent que les rappels sont fortement liés aux focus de conception. Or la répartition fonctionnelle et l'aménagement sont deux focus majoritaires de la conception. La structure et l'implantation du projet, imposées dans l'énoncé pédagogique de l'APC, ne faisant pas l'objet de conception, il semble logique que ces éléments n'aient donc pas fait l'objet de rappel non plus. Ils pourraient néanmoins être rappelés dans d'autres contextes de conception. Concernant les matériaux, le faible temps disponible pour concevoir peut expliquer que les sujets n'aient pas abordés de focus aussi spécifiques que les matériaux et se soient concentrés sur les aspects les plus importants du projet.

Nous avons souhaité analyser les représentations externes sur lesquelles les attributs rappelés figuraient de manière à savoir dans quels documents nous serions amenés à capturer les informations. Malheureusement, les sujets de cette expérience courte ont exclusivement conçu le projet sur les plans du rez-de-chaussée et de l'étage.

Au vu de ces résultats et de notre objectif de collecter l'information pour nourrir la maquette BIM, il sera essentiel de collecter les informations relatives aux raisons de choix d'aménagement, aux emplacements des espaces-fonctions et aux natures des frontières entre ceux-ci. Ces informations sont en effets à ce jour peu présentes dans les composants des maquettes BIM et sont visiblement essentielles à ancrer pour la conception.

8.2 Rôles des rappels

Sur base de nos observations, nous pouvons discerner plusieurs rôles des rappels dans les activités de conception que nous synthétisons à la figure 7.

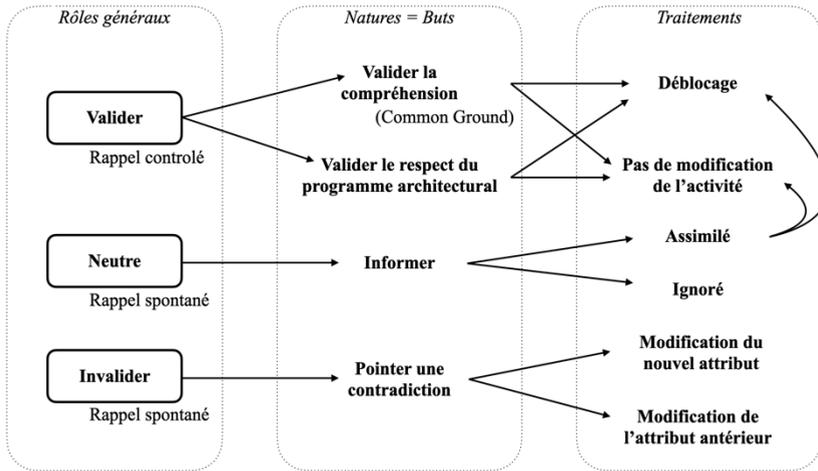


Fig. 7. Schématisation des rôles des rappels.

Trois grands rôles se dégagent de nos observations (colonne de gauche sur la figure 7) : un rôle de validation, un rôle neutre d'information et un rôle d'invalidation.

La validation peut porter (1) sur les activités de conception lorsque l'acteur valide sa compréhension pour établir un référentiel commun [28] comme, par exemple, lorsque l'acteur C demande confirmation de la forme imaginée par A et B pour les étagères de la vitrine; (2) sur le projet, lorsque le(s) acteur(s) valide(nt) que le bâtiment conçu répond bien au programme ou à des attendus. Ces validations sont toujours des rappels contrôlés, au sens de Ben Rajeb et Leclercq [25, 26]. Ils naissent d'un besoin et sont appelés par les acteurs. Ils ne sont donc, avec logique, pas ignorés. Ils servent toujours l'action en cours : soit en la débloquent si elle était bloquée, soit en la nourrissant et en la laissant perdurer.

De l'autre côté, l'invalidation consiste à pointer une contradiction. C'est un rappel spontané, survenant dès qu'un acteur constate une incompatibilité ou une erreur dans le projet. Ce rappel ne peut pas non plus être ignoré et il mène à une modification de l'objet architectural. Les concepteurs peuvent choisir de modifier la nouvelle idée en cours de conception (comme lorsque B a déplacé une porte suite au rappel par A de l'existence de cette porte à l'endroit où venaient d'être dessinés des fauteuils) ou alors d'adapter l'attribut antérieur pour concrétiser cette nouvelle idée (si B avait déplacé les fauteuils).

Finalement, certains rappels ne visent ni à valider ni à invalider. Neutres et spontanés, ils sont informatifs. Ils peuvent donc être ignorés ou assimilés par les autres acteurs en fonction de leur pertinence. Citons l'exemple de C qui rappelle le besoin d'un emplacement sur la façade pour l'enseigne alors que A et B travaillent sur le plan du RDC. Mais dans presque tous les cas, ils sont assimilés et servent donc l'activité de conception de la même manière qu'un rappel de validation.

8.3 Moments préférentiels de rappel

Les différents rappels semblent être mobilisés tout au long du processus et quelle que soit la séquence (figure 8) sauf à deux moments précis : (1) lors de l'introduction, pendant laquelle les concepteurs se contentent de s'informer de la demande et du programme formulés dans l'énoncé pédagogique; (2) lors de la remise en contexte, pendant laquelle les concepteurs se sont uniquement coordonnés avant de commencer le travail de concrétisation de leurs choix et la production des livrables.

Seul le rappel d'invalidation n'est plus utilisé en phase de production. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les acteurs ont, en effet, globalement fini de concevoir et souhaitent, en fin de processus, produire les livrables en remettant les plans au propre.

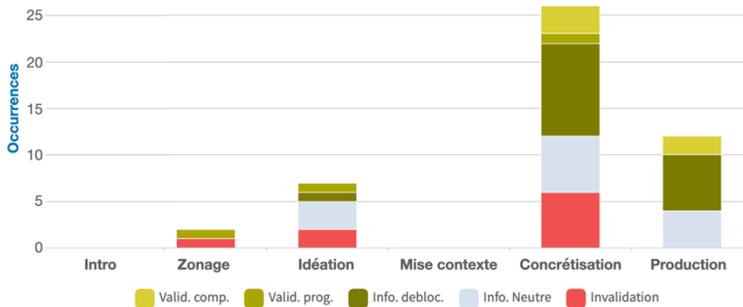


Fig. 8. Distribution des usages sur chaque séquence des différents rôles des rappels (équipe 1).

9 Conclusion

Dans cette recherche, nous interrogeons les écosystèmes numériques en nous plaçant dans une démarche de questionnement des pratiques BIM, visant à faire évoluer l'usage de ces systèmes d'information. Suite à plusieurs lectures sur l'implication de ces méthodes numériques dans la conception architecturale, il est constaté que le BIM est en inadéquation avec les activités de conception, notamment dans la gestion des informations. Nous tentons dès lors d'identifier et de caractériser les informations utiles aux concepteurs en phase d'idéation et de conception sommaire. Pour cela, nous avons observé une capsule de conception et nous avons relevé, tout au long de ce processus, les rappels d'attribut conçu auparavant dans le processus de conception. A titre d'exemple, pour une des équipes, 47 rappels ont été observés en seulement deux heures ce qui démontre bien la place que prend l'information dans la gestion de projet, même dans les phases préliminaires en conception. Ces rappels nous ont aussi permis d'analyser les types d'attribut du bâtiment faisant l'objet de rappel, les rôles de ces rappels dans la conception et les moments du processus où sont formulés les rappels.

A l'issue de ces analyses, nous pouvons en conclure qu'il sera essentiel de collecter les informations relatives au raisons de choix d'aménagement, aux emplacements des espaces-fonctions et aux natures des frontières entre ceux-ci. Ces informations sont en effet à ce jour peu présentes dans les maquettes BIM mais sont visiblement essentielles pour ancrer la conception. En outre, nous identifions trois grands rôles, mobilisés tout au long du processus, joués par le rappel d'un attribut préalablement conçu lors du processus de conception :

- la validation, de la compréhension du projet ou de la réponse au programme, née d'un besoin et servant toujours l'action en cours, soit en la débloquent si elle était bloquée, soit en la nourrissant et en la laissant perdurer;
- l'invalidation, pointant une contradiction et menant à une modification du projet;
- et l'information neutre, pouvant être ignorée ou assimilée suivant sa pertinence.

Cette étude présente une limite, inhérente au cadre de recherche, qui est conditionnée par la capsule de conception qui durait seulement deux heures. Si cette modalité apporte des bénéfices expérimentaux, nous avons par contre observé peu de variation des représentations externes, comme on pourrait l'observer habituellement dans un processus

de conception en contexte réel. Pour des raisons d'efficacité de conception, il est également possible que les données récoltées relatives aux représentations externes puissent varier d'avantage dans d'autres contextes de conception en phase préliminaire. Néanmoins, ce premier travail d'analyse d'une expérience contrôlée en laboratoire nous a aidé à confirmer les typologies d'attribut proposées en amont et à spécifier les principaux rôles qui en découlent.

Pour la suite, nous analyserons un processus de conception plus long et portant sur une conception plus proche d'un contexte réel pour, d'une part, asseoir les premiers résultats obtenus ici et pour, d'autre part, identifier les natures d'actions déclenchant ces rappels et qualifier les représentations externes sur lesquelles les attributs rappelés apparaissent.

Nous remercions les concepteurs du Master Ir. Civil Architecte à l'Université de Liège de l'année académique 2021/2022 pour leur participation à l'expérience menée. Nous remercions également le F.R.S.-F.N.R.S. pour les subventions ayant permis cette recherche.

Références

1. Celnik, O. et Lebègue, E. (2014). *BIM & Maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. Paris: Eyrolles et CSTB.
2. Hijazi, A., & Omar, H. (2017). Level of detail specifications, standards and file-format challenges in infrastructure projects for BIM level three. *WIT Transactions on The Built Environment*, 169, 143-154.
3. Beaudouin-Lafon, M., Bødker, S., & Mackay, W. E. (2021). Generative theories of interaction. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 28(6), 1-54.
4. Estevez, D., 2001. *Dessin d'architecture et infographie : L'évolution contemporaine des pratiques graphiques*, Paris : CNRS Editions.
5. Dautremont, C., Martin, V., & Jancart, S. (2020). Multidisciplinarité en conception architecturale: retour sur deux décennies en agence. *Actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique*.
6. 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.
7. Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
8. Huot, S. (2005). Une nouvelle approche pour la conception créative: De l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions non-standard (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
9. Baudoux, G., Calixte, C. & Leclercq, P. (sous presses). Transition between architectural ideation and BIM: Towards a new method through semantic building modeling. In *Proceedings of the 40th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*.
10. 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.
11. Rahhal, A., Ben Rajeb, S., & Leclercq, P. (2020). Caractérisation de l'information dans une collaboration BIM.
12. NSCSC, Nova Scotia Construction Sector Council, Industrial Commercial Institutional (2010). *Functional Information Technology Phase 1: Detailed Analysis*, préparé par le Construction Engineering and Management Group de l'Université du Nouveau Brunswick
13. LIST, Luxembourg Institute of Science & Technologie (2015). Récupéré sur la méthode BIMetric : <http://bimetric.list.lu/>
14. CIC (Computer Integrated Construction Research Program). (2010). *BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.0*. From The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA: <http://bim.psu.edu/Project/resources/default.aspx>
15. CEFRIO, (2011), "Améliorer l'efficacité et la productivité du secteur de la construction grâce aux technologies numériques", publication du CEFRIO, groupe canadien d'experts sur l'appropriation et l'utilisation du numérique (150 universitaires, industriels et gouvernementaux), Québec, Canada.
16. Staub-French, S. e. (2011). *Building Information Modeling (BIM) 'Best Practices' Project Report*. Récupéré sur bim-civil.sites.olt.ubc.ca/files/2014/06/BIMBestPractices2011.pdf

17. Al Hattab, M., & Hamzeh, F. (2016). Analyzing design workflow: An agent-based modeling approach. *Procedia engineering*, 164, 510-517.
18. Migilinskas, D., Popov, V., Juocevicius, V., & Ustinovichius, L. (2013). The benefits, obstacles and problems of practical BIM implementation. *Procedia Engineering*, 57, 767-774.
19. Calixte, X., Ben Rajeb, S., Gronier, G. & Leclercq, P. (2019). Questionnement de la synchronisation de l'information pas les usages logiciels (BIM) en conception architecturale collaborative. *10ème colloque de Psychologie Ergonomique, ÉPIQUE*, Lyon, France.
20. Conrad Boton, Daniel Forgues, "Practices and Processes in BIM Projects: An Exploratory Case Study", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Article ID 7259659, 12 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7259659>
21. Hochscheid, É., & Halin, G. (2018). L'adoption du BIM dans les agences d'architecture en France. *SCAN18 - Immersion et Émersion*.
22. 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.
23. Mohamed-Ahmed, A. (2013). Proposition d'une méthode mixte d'évaluation de l'incidence des média sur le processus de conception architecturale. Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada.
24. Goldschmidt, G. (1997). Capturing inderterminism: representation in the design problem space. *Design Studies* 18(4): 441-445.
25. Ben Rajeb, S. & Leclercq, P. (2016). Analysis of Collaborative Design through Action Research: Methodology and Tools. In *IARIA Journals, International Journal on Advances in Intelligent Systems*, vol 9 no 1 & 2, http://www.iariajournals.org/intelligent_systems/, pp.199-212.
26. Ben Rajeb, S. & Leclercq, P. (2015a). Co-construction of meaning via a collaborative action research approach. Yuhua Luo éd., In *LNCS, Lecture Notes in Computer Sciences*, vol 9320, *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, pp. 205-215.
27. Ben Rajeb, S. & Leclercq, P. (2015b). Instrumented analysis method for collaboration activities. *Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Collaborative Networks, Systems and Applications, COLLA 2015*, San Julian, Malta.
28. Falzon, P., & Darses, F. (1996). La conception collective: une approche de l'ergonomie cognitive. *Coopération et conception, Octarès*, 123-135.
29. Baudoux, G., Calixte, X., & Leclercq, P. (2021). Pratiques d'écriture collaborative en conception architecturale: Caractérisation de l'information-projet en regard de l'usage des médias. In *Conférence H2PTM'21-Information: enjeux et nouveaux défis*. ISTE Editions, London, United Kingdom.