

Evolution des pratiques en conception: une approche ergonomique compréhensive des objets médiateurs.

Catherine Elsen

Françoise Darses

Pierre Leclercq

LUCID-ULg, F.R.S.-FNRS
Chemin des chevreuils, 1, bat
B52/3, 4000 Liège (Belgique)
catherine.elsen@ulg.ac.be

Université Paris Sud, LIMSI-
CNRS, bat. 508, BP 13391403
Orsay Cedex (France)
francoise.darses@limsi.fr

LUCID-ULg
pierre.leclercq@ulg.ac.be

RESUME

Cet article examine l'évolution et la modulation des usages des « objets médiateurs » en design industriel depuis l'avènement des outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Ces outils ont longtemps été étudiés en regard des avantages et inconvénients que leur utilisation constituait pour le processus de conception, et toujours en comparaison des outils dits « traditionnels » (dessins à main levée, maquettes) [9 ; 5]. L'article suggère d'étudier plutôt ces outils, médiateurs de l'activité de conception, pour leur complémentarité qui apparaît parfois très en amont du processus de conception (dès la phase conceptuelle). Les bases théoriques qui structurent l'ensemble de l'intervention sont présentées et discutées à la lumière de cette suggestion tout comme les principaux résultats d'une intervention *in situ*, pour une objectivation des nouvelles pratiques « métier ».

MOTS CLES : Evolution des pratiques en conception industrielle, approche ergonomique, objets médiateurs.

ABSTRACT

This paper studies the evolution and modulation of “mediating objects” use in industrial design since the introduction of CAD (Computer Aided Design) tools. These tools have generally been studied for their pros and cons inside the design process, and always in comparison with more “traditional” tools (free-hand sketches or physical models) [9; 5]. The paper suggests rather to consider these mediating tools' complementarities, that can sometimes occur very early inside the design process (since ideation). The theoretical basis that structure the whole intervention are presented and discussed given this suggestion, as well as the *in situ* intervention's main results. The new professional work-habits are objectivised.

KEYWORDS : Evolution of industrial design practices, ergonomics, mediating objects.

L'EXPLOITATION DES OUTILS DE CONCEPTION : UN PARADOXE ?

Les outils numériques de conception, dits de « Conception Assistée par Ordinateur » (CAO), impactent de manière décisive les pratiques professionnelles en

architecture, design industriel, ingénierie mécanique... depuis bientôt une trentaine d'années. Ces outils, initialement conçus afin d'optimiser, d'évaluer et de produire des objets dont la conception en tant que telle est considérée comme achevée, voient rapidement leur utilisation adaptée aux évolutions des contextes de travail. Les opérateurs les exploitent à des fins communicatives et commerciales (grâce aux visualisations dynamiques) et parfois même créatives [11].

Ces détournements suscitent dans les communautés scientifiques de nombreux questionnements. La créativité et ses médias sont remis en question (la créativité est-elle associée, pour chaque métier, à un outil particulier ? peut-elle se manifester au travers de toute interface, même numérique ?) ainsi que les caractéristiques intrinsèques de la conception par exemple (frontières entre pré-conception et production ? acteurs privilégiés ? avantages d'une interface dédiée ?). Ces débats témoignent de la nécessité de réintégrer l'examen de la conception et de ses outils dans un contexte plus large d'évolution des pratiques.

Dans les domaines de l'architecture et du design industriel, ces outils ont été quasi systématiquement étudiés en comparant leurs avantages et inconvénients respectifs. Ainsi, de nombreuses recherches (le plus souvent expérimentales et mettant des concepteurs en situation de conception pendant quelques heures) étudient les outils dits plus « traditionnels », tels que dessins à main levée ; maquettes ou prototypes [11; 2] en regard des potentialités offertes par les logiciels de CAO. La plupart des auteurs soulignent l'efficacité du dessin « papier-crayon » comme soutien de l'émergence des idées en phase de « pré-conception » tandis que la CAO constitue d'après eux encore un frein à la créativité mais un véritable catalyseur des phases productives [13 ; 12]. Un verrou subsiste donc dans l'approche intégrative de ces différents instruments pour la mise au point d'un « super-outil » soutenant l'ensemble du processus de conception.

Pourtant, il se pourrait aujourd'hui que ces outils, traditionnels ou numériques, avec leurs potentiels et limitations, s'associent étroitement tout au long du processus

[8]. Le verrou illustré par une large littérature ne semble donc pas être un frein aux capacités d'adaptation et d'apprentissage des opérateurs confrontés aux contraintes des différents contextes de travail.

Nous proposons d'approfondir l'examen de cet apparent paradoxe grâce aux méthodologies adaptées de l'ergonomie et de la théorie de l'activité.

FONDEMENTS METHODOLOGIQUES ET THEORIQUES

Trois propositions fondamentales structurent notre intervention. Tout d'abord l'approche ergonomique « anthropo-centrée », basée sur la théorie de l'activité. Cette approche recentre l'étude du processus de conception sur l'homme, acteur principal, qui évolue au sein d'un contexte particulier, en relation avec ses propres productions et avec d'autres acteurs de la conception. Ce point de vue anthropo-centré élargit le domaine d'étude à tous les acteurs concernés (de près ou de loin) par l'activité étudiée dans sa globalité, et évite ainsi de limiter le champ d'investigation au seul « utilisateur final ».

La théorie instrumentale constitue le second pilier théorique et méthodologique et outille l'examen des traces laissées par l'activité, appelées ici « objets médiateurs » [10 ; 1]. Le terme d'objet permet d'étendre la notion d'artefact (ici, l'outil de conception) aux représentations externes générées par celui-ci.

Un dernier principe théorique, qui garde à ce stade un statut hypothétique, est avancé. Ce principe, nommé « de non dichotomie », suggère de considérer les objets médiateurs (utilisés en pratique) plutôt pour leurs avantages

respectifs et selon leurs caractères complémentaires, et non plus sur la traditionnelle base comparative.

L'INTERVENTION *IN SITU* ET LE TRAITEMENT DES DONNEES

Une intervention *in situ* de deux mois a permis de tester la validité de ces propositions théoriques pour l'évaluation des nouveaux usages des objets médiateurs et des nouvelles pratiques en design industriel. L'observateur a eu l'opportunité de mener des séances continues d'observation, 8 heures par jour, au sein des bureaux « open space » d'une équipe de conception (designers industriels et dessinateurs) travaillant dans le domaine pointu de la conception de corps de chauffe. Les données récoltées proviennent non seulement de ces observations *in situ* de produits en cours de conception mais aussi d'entretiens semi-directifs et d'analyses rétrospectives (de projets achevés ou en cours). Cinq produits clés de l'entreprise sont choisis pour leur représentativité tant sur le plan du processus de conception que du fonctionnement de l'équipe ou de l'utilisation des objets médiateurs.

Des « lignes du temps » sont construites pour ces projets sur base des observations et verbatim recueillis, complétés par des graphes d'activité des acteurs de la conception. Ces données permettent de retracer l'historique de conception des 5 produits et de l'utilisation qui est faite des objets médiateurs (en relation avec les contraintes apparaissantes et les modalités collaboratives). Ces lignes du temps sont constituées, en abscisse, de l'échelle temporelle du processus de conception capturé (Fig.1). La densité des informations présentées chronologiquement varie en fonction de la source: la granulométrie des

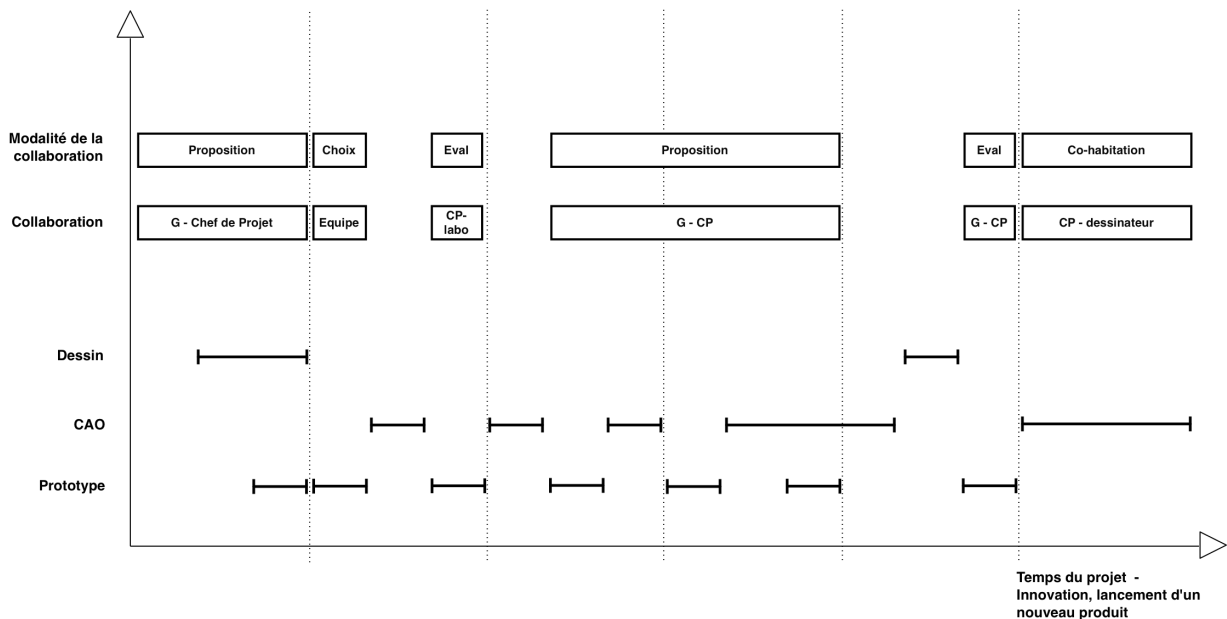


Figure 1 : La ligne du temps d'un des projets illustre les séquences d'utilisation des objets médiateurs en relation avec la modalité collaborative en cours.

informations issues d'un entretien (relatant en 90 minutes l'ensemble d'un processus de conception – approche « macroscopique ») sera moins fine que celles issues d'une observation instantanée d'un « moment de conception » (approche « microscopique »). En ordonnée, les lignes du temps présentent les différents critères codés, à savoir les modalités de collaboration et les exploitations faites des différents objets médiateurs, toujours en regard de l'étape courante du processus de conception. Ces différentes étapes de la conception sont classées selon ces critères de codage et sont structurées graphiquement de manière à ce que leur analyse révèle (i) sur un axe vertical les occurrences concourantes de leurs caractéristiques et (ii) sur un axe horizontal leur importance temporelle au sein du processus (via la longueur des bâtonnets).

Cette méthode, malgré ses limitations, nous permet de rassembler un maximum de données durant une fenêtre temporelle d'intervention relativement limitée. Son caractère qualitatif permet de prendre en compte certains « sauts » de conception, isolés et très courts mais porteurs d'une signification primordiale pour la compréhension du processus et qui seraient erronément mis au second plan au travers d'une analyse plus quantitative, comme le soulignent Brassac & Grégori [3]. Elle nous permet également d'éviter les limitations d'une expérimentation moins réaliste en laboratoire ou les gênes provoquées par un protocole « think aloud ».

RESULTATS

Nous discutons ici trois types de résultats. Les principaux apports de la recherche sont résumés dans un premier temps (pour plus de détails, voir [8]). Nous proposons ensuite un graphe d'activité global de l'équipe, construit en coopération lors du retour d'expérience, et qui constitue l'abstraction d'un processus de pré-conception plus adapté à leurs modes de travail en particulier. Nous confirmons enfin l'efficacité des propositions fondamentales sélectionnées comme structures théoriques.

Evolution des pratiques en conception

Les résultats issus de notre recherche confirment le fort impact qu'ont les outils de Conception Assistée par Ordinateur, et ce sur n'importe quel stade du processus de conception. Les lignes du temps et les propos recueillis révèlent que ces outils sont utilisés toujours plus en amont du processus, et font maintenant partie intégrante des pratiques quotidiennes. Nous avons en effet pu observer que les outils de modélisation 3D sont utilisés très tôt, et constituent dans certaines conditions un réel soutien à l'idéation. Leurs fonctionnalités, autrefois prévues uniquement en phase de production, sont parfois même exploitées *avant* le recours à tout autre outil (le dessin à main levée, par exemple). Les modélisations grossières ou « esquissées », les visualisations dynamiques, la possibilité d'introduire une nouvelle pièce au sein d'un environnement préexistant (afin de tester les conflits et

l'interfaçage avec les autres pièces, tant en statique que dynamique) et le test rapide des proportions sont autant de fonctionnalités détournées et adaptées par l'utilisateur dès le stade formel, dans un souci d'efficacité et de complémentarité avec les autres outils à sa disposition.

Au delà de ce recours à la CAO comme premier instrument de la conception (dont la généralisation doit être testée), de nombreux allers-retours apparaissent lors de l'utilisation des objets médiateurs et contribuent à notre hypothèse de non-dichotomie. Les phases autrefois dites « conceptuelles » et associées exclusivement au dessin à main levée voient donc leurs frontières élargies à l'utilisation de la CAO via des modèles 3D « esquissés », simples dans leur construction, non détaillés et rapidement paramétrables. De plus, et respectivement, le dessin à main levée peut être utilisé plus tard durant la phase productive de la conception afin de mettre au point et tester une solution technique à un « nœud technologique » qui aurait été décelé au cours de la modélisation numérique. Des « micro-phases » d'idéation conceptuelle et de résolution technologique réapparaissent ainsi tout au long du processus et génèrent de constants allers-retours entre les objets médiateurs à disposition des acteurs, selon les objectifs poursuivis et les apports respectifs des outils. Il est donc nécessaire de faire une distinction entre modèle numérique (2D ou 3D) *esquissé* ou *détaillé*, dessin à main levée *d'esquisse* ou *technologique*.

Cette intégration constante de l'outil numérique au sein des pratiques quotidiennes a d'autres conséquences, sur le degré d'expertise, la collaboration ou encore la répartition des tâches. La preuve la plus flagrante est la redéfinition de l'activité des dessinateurs industriels. Ceux-ci, auparavant simples exécutants dont l'unique objectif était la mise en plan de production des objets de la conception, voient leurs tâches évoluer vers une prise de responsabilité grandissante au sein du processus de conception. Les dessinateurs participent en effet activement au développement du produit, tout au long de son histoire, et de plusieurs façons. Recevant de la part du designer-collaborateur une esquisse (dessin ou modèle 3D grossier), leur principal objectif reste la mise en plans de détail. Mais, tout comme les designers s'approprient toujours mieux et plus vite l'outil de modélisation, les dessinateurs voient leurs compétences évoluer en matière de conception technique et industrielle. Plusieurs stratégies sont mises au point par les dessinateurs.

- *La détection des erreurs.* Les dessinateurs, supposés experts en manipulation du logiciel de modélisation, deviennent peu à peu experts en technologie de conception de corps de chauffe. Quelques fois plus au fait des priorités des prototypistes et ouvriers, ils vont participer à la détection d'erreurs et d'infaisabilités techniques, vont proposer des alternatives aux designers, en s'emparant pour cela parfois même d'un crayon, empruntant dès lors un outil de conception qui ne leur est

pourtant pas initialement destiné. Il est noter que, respectivement, les designers experts peuvent conseiller des dessinateurs novices en matière de manipulation de l'outil de CAO.

- *La programmation de la modélisation.* Les dessinateurs, qui ne sont pas généralement les auteurs des esquisses qu'ils ont à traiter, développent une stratégie de « programmation de la modélisation ». Un opérateur dit à ce sujet que « *la question du comment modéliser se pose plus souvent que celle du quoi modéliser* ». Dans un souci d'efficacité, ils mettent au point anticipativement à toute modélisation une stratégie efficace de construction du modèle, afin de gagner du temps et construire une représentation qui soit cohérente et corresponde à une réalité constructive. Pour atteindre cet objectif, ils exploitent leurs propres compétences construites sur base d'un apprentissage constant, via l'écoute flottante active, la traçabilité du « design rationale », l'organisation de réunions informelles de synchronisation cognitive [6 ; 7], tant de phénomènes rendus possibles par la configuration en « open space » des bureaux. Les dessinateurs détectent de ce fait plus facilement certains éléments clés du dessin, tels que les nœuds techniques et points durs (points de passage obligés de certains profils), principes cinématiques et constructifs, pièces standardisées etc. ce qui rend effectivement leur travail plus efficace.

- *L'intégration des acteurs aval de la production.* Nous avons constaté, de la part des dessinateurs, une volonté constante de faire participer au processus de conception/modélisation les acteurs aval de la production (prototypistes, soudeurs, techniciens, ...). Cette volonté, peut-être motivée par le sentiment d'une proximité intentionnelle « technologique », fait des dessinateurs les acteurs privilégiés d'une coopération « amont-aval » qui facilite les échanges d'informations.

Des stratégies sont également mises au point de la part des designers, en adaptation constante face aux types de projets, types de clients et éléments contextuels. Ils font preuve par exemple d'une grande flexibilité durant la collaboration. Ils adaptent le contenu de la représentation partagée afin d'en rendre le contenu plus facilement appréhendable. Ils modulent leurs discours et ont recours, si besoin est, à de multiples interfaces utilisées conjointement pour mieux se faire comprendre. Généralement, nous observons que deux acteurs en collaboration utilisent toujours l'interface de coopération qui s'approche le plus des caractéristiques communes de leurs métiers respectifs et des représentations qui leur sont habituelles. Par exemple, un designer et un prototypiste partageant leurs connaissances en méthodes de production et assemblage de pièces échangent devant le prototype ; dessinateur et designer « chef de projet », moins au fait des dernières modifications, coopèrent et se synchronisent devant un modèle 3D, désignent à l'écran en réintégrant toujours les pièces modifiées au sein d'un environnement pré-existant, connu de tous; designers et personnel

du service marketing négocieront devant une maquette à l'aspect formel finalisé, etc.

Nous pouvons donc souligner l'efficacité des stratégies développées par les acteurs de la conception en matière de répartition des tâches, sélection des objets médiateurs et exploitation de leurs respectives complémentarités. Les modalités collaboratives développées dans cette équipe ne sont certes pas parfaites, mais certaines réponses à des problèmes récurrents peuvent être trouvées dès la phase de pré-conception, comme le suggère la section suivante.

Graphe d'activité de conception : proposition

L'entreprise nous accueillant nous a fait immédiatement part de quelques unes de ses difficultés. On peut les résumer à un manque de communication entre l'équipe de conception et l'équipe de montage ; des pertes de temps (et d'argent) au stade de la conception, qui se traduisent par de nombreux prototypes testés et rejetés pour des erreurs qui auraient pu être évitées ; des rendements actuels insuffisants (55% à peine) et une démotivation générale des ouvriers. Le responsable espère que notre étude peut améliorer la situation via une « rentabilisation » du processus de conception.

Cette demande initiale n'a pas été étudiée dans une optique d'intervention professionnelle. Pourtant les apports plus conceptuels de notre recherche nous ont en effet aidés à comprendre quelles améliorations des conditions de travail en conception industrielle pouvaient concourir à l'atteinte d'objectifs ergonomiques pour d'autres métiers, d'autres stades du processus et d'autres opérateurs. Ces améliorations se déclinent selon nous en (i) une conception préliminaire plus efficace, traitant plus tôt les nœuds technologiques et évitant quelques allers/retours inutiles (diminution du temps de production et des coûts, augmentation du rendement de l'entreprise); (ii) des modalités collaboratives et répartitions des tâches mieux définies qui rendent les processus plus efficaces et (iii) une conception intégrant dès les phases amont, avec l'aide d'experts-conseil, des considérations de montage et mise en production facilitant les tâches des ouvriers.

Ces améliorations se concrétisent grâce à diverses propositions :

- veiller à éviter les situations de co-activité en conception, avec les sous-traitants notamment, qui se traduisent par une méconnaissance du travail de l'autre et un suivi incomplet du projet;
- en conséquence, faciliter la construction d'un « design rationale », la conservation de la logique de conception étant reconnue comme un aspect primordial de l'implémentation des connaissances en entreprise [4];
- favoriser les processus de synchronisation cognitive pour une construction plus efficace du référentiel commun et des connaissances. Proposer par exemple aux

dessinateurs de mettre en commun leurs méthodes de programmation de la modélisation;

- recentrer chacun sur ses tâches tout en rééquilibrant la hiérarchie.

Nous proposons également un graphe d'activité global (Fig.2), qui reprend à la fois (i) sur la gauche, la modalité d'externalisation et d'utilisation des objets médiateurs suggérée; (ii) au centre, un graphe simplifié de l'activité de l'ensemble de l'équipe ainsi que (iii) les relations collaboratives et enfin (iv) sur la droite, une proposition de répartition temporelle "efficiente".

Ce graphe d'activité global propose, pour chaque étape "clé" du processus de conception, un rassemblement d'opérateurs pour une séance de conception collaborative, qui pourrait être construite sur les méthodes participatives par exemple. Certains acteurs de la conception, apparaissant habituellement plus tard dans le processus (comme le prototypiste) sont convoqués bien plus tôt pour une définition conjointe des nœuds technologiques. Nous conseillons que l'étude de ces nœuds devienne une part majeure du travail de l'équipe au travers d'ébauches et "d'esquisses" de principe (physiques ou numériques), et que les modèles *détaillés* et prototypes, très consommateurs en temps, arrivent plus tard s'il s'avèrent nécessaires.

Le rassemblement en équipes de conception plus en amont dans le processus permet de définir plus clairement les tâches et champs de compétences de chacun,

avec l'accord de tous, et d'opérationnaliser les échanges.

Discussion : les fondements

Les fondements sélectionnés comme bases méthodologiques et théoriques nous ont efficacement soutenus tout au long de notre recherche. L'hypothèse de non-dichotomie se vérifie non seulement entre designers et dessinateurs (il n'existe plus des *designers qui dessinent* contre des *dessinateurs qui modélisent*) mais aussi entre méthodes de conception (la comparaison entre *designers qui dessinent* contre *designers qui modélisent* n'a plus lieu d'être).

La théorie instrumentale, en particulier, s'est avérée être un moyen efficace d'approcher les réalités métiers via l'étude des traces de l'activité. Dans le contexte qui nous occupe, nous avons choisi de recentrer l'étude du processus de conception et de l'acte de concevoir (*l'objet*), sur l'homme (*le sujet*), un acteur pas nécessairement *évident*, qui évolue au sein d'un contexte particulier, en relation avec ses propres productions et avec d'autres acteurs de la conception et qui utilise *des instruments (outils ou représentations et leurs schèmes associés)* (Fig 3.). Choisir « l'acte de concevoir » comme objet de l'activité peut mener à discussion, surtout dans un domaine tel que la pré-conception industrielle. Concernant l'objet, une confusion peut en effet apparaître entre (i) l'activité en elle-même, soit *concevoir*, (ii) le produit, ou le *design*, et (iii) l'objet "esquisse" (le résultat intermédiaire d'une activité qui serait "dessiner"). De même, la partie « artefact » de l'instrument peut respectivement être vue comme (i) l'ordinateur (ii) le papier/crayon ou

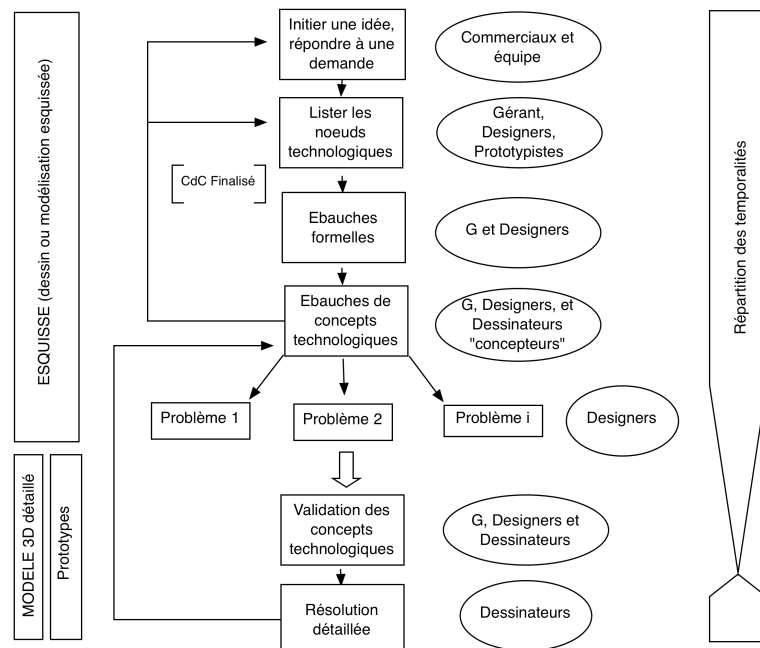


Figure 2 : Le graphe d'activité proposé résume notre proposition en matière (i) d'utilisation des objets médiateurs ; (ii) de répartition des tâches et (iii) de répartition du temps de travail.

(iii) l'esquisse en elle même (si l'on considère que l'objet de l'activité n'est pas l'acte de dessiner mais bien l'acte de concevoir). Notre positionnement, soit l'élargissement de l'objet de l'activité à l'entière activité de conception (individuelle ou collaborative, de la part de l'acteur évident, le designer, ou de ses collègues) et la volonté d'élargir les artefacts à tous les objets médiateurs, constitue une des voies possibles d'étude.

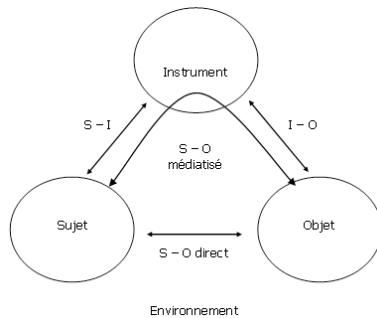


Figure 3 : Le modèle SAI de Rabardel et Vérillon (Systèmes d'Activités Instrumentées).

CONCLUSIONS

Les méthodes ergonomiques d'observation et recueil des données *in situ* nous ont permis d'élargir les frontières traditionnelles des « phases » de la conception et des usages de ses outils, traditionnels ou non. Cette recherche nous a permis d'examiner les évolutions des pratiques « métier » et de rendre compte, d'une manière certes encore trop limitée, des modulations, adaptations, déviations des objets médiateurs, par les opérateurs *au service* de leurs tâches. L'hypothèse de non-dichotomie semble s'accorder à une réalité professionnelle toujours plus contraignante, où le designer doit rapidement tirer parti de toutes les complémentarités des objets à sa disposition afin d'atteindre l'objet de son travail. Nous avons vu que les notions d'expertise en design industriel, modélisation 3D et génération de plans de production considérées séparément ne permettent plus la description complète des tâches, et cet aspect devra être approfondi au travers d'autres interventions, tout comme la définition d'objets *esquissés* ou *détaillés*.

Le panorama dressé dans le domaine spécifiquement étudié nous permet d'entrevoir des solutions pour (i) une résolution de certains problèmes des phases aval des processus de production et (ii) la mise au point d'outils de soutien aux phases de conception qui soient plus adaptés aux pratiques réelles et en constante évolution de ces métiers complexes. Ces outils de soutien pourraient efficacement tirer parti du caractère complémentaire et multi-modal des objets médiateurs analysés.

BIBLIOGRAPHIE

1. Beguin, P. and Rabardel, P. *Designing for instrument-mediated activity*. Scandinavian Journal of Information Systems, 2000.
2. Bilda, Z. and Gero, J.S. Do we need CAD during Conceptual Design ? *Proceedings of Computer Aided Architectural Design Futures*, 2005.
3. Brassac, C. & Grégori, N. *Etude clinique d'une activité collaborative : la conception d'un artefact*. Le travail Humain, 2003/2, Vol 66, PUF, 2003, pp 101-126.
4. Cahour, B. *Décalages socio-cognitifs en réunions de conception participative* - Le travail humain, 2002/4, Vol 65, PUF, 2002, pp 315-337.
5. Cross, N. *Strategies for Product Design, Third Edition*. Nigel Cross. The open University, Milton Keynes, UK, Ed. Wiley, 2000.
6. Darses, F. *Processus psychologiques de résolution collective des problèmes de conception : contribution de la psychologie ergonomique*. Document de synthèse en vue d'obtenir une Habilitation à Diriger des Recherches. Université Paris V - René Descartes, 2004.
7. Darses, F., Détienne, F. & Visser, W. Les activités de conception et leur assistance, In Falzon P. (Eds), *Ergonomie*, PUF, 2004, pp 545-563.
8. Elsen, C., Darses, F. and Leclercq, P. An user-centered standpoint on mediating objects: evolution and extension of industrial design practices. *Proceedings of DCC'2010 - Fourth International Conference on Design Computing and Cognition*, July 2010. Under Press (Accepted paper for oral presentation and publishing).
9. Goel, V. *Sketches of Thought*, Bradford MIT Press, Cambridge, 1995.
10. Rabardel P. *Les hommes et les technologies, approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : Armand Colin, 1995.
11. Robertson, B.F. and Radcliffe, D.F. *Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design*. Computer-Aided Design 41, 2009, pp. 136-146.
12. Suwa, M., Purcell, T. and Gero, J. *Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions*. Design Studies, Vol 19, Issue 4, 1998, pages 455-483.
13. Ullman, D.G., Wood, S. and Craig, D. *The importance of drawing in the mechanical design process*. NSF engineering design research conference (June), 1989.