

ASHRAF MOHAMED AHMED

**PROPOSITION D'UNE MÉTHODE MIXTE
D'ÉVALUATION DE L'INCIDENCE DES MEDIA
SUR LE PROCESSUS DE CONCEPTION
ARCHITECTURALE**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat sur mesure en cotutelle en conception
architecturale assistée par ordinateur
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

FACULTÉ D'AMÉNAGEMENT, D'ARCHITECTURE ET DES ARTS VISUELS
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

Et

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
pour l'obtention du grade de doctorat en psychologie, spécialité ergonomie cognitive

2013

Résumé

La thèse traite de l'incidence des media d'aide à la conception sur le processus de conception architecturale. Plus spécifiquement, en se basant sur une littérature multidisciplinaire, l'objectif de la thèse est d'analyser l'incidence de trois media, utilisés traditionnellement dans les milieux académique et professionnel, soit l'esquisse à main levée, la maquette et le logiciel de conception assistée par ordinateur (ici, Sketch-UP 7.0) sur le concepteur, le processus de conception architecturale et de la qualité des projets générés.

35 étudiants en architecture ont participé à cette étude. Une méthodologie d'évaluation mixte de cette incidence est proposée, soit d'une part des mesures quantitatives pour évaluer les capacités visuo-spatiales des étudiants-concepteurs (tests psychométriques), la gestion de leur charge cognitive (tâche secondaire) lors du processus de conception et d'autre part, des mesures qualitatives de la gestion de la charge cognitive (questionnaire du NASATLX) et de la qualité des projets générés (évaluation consensuelle d'experts).

Les résultats n'ont pas permis de montrer de différence significative entre les media concernant les deux mesures de la charge cognitive, ainsi que pour la qualité des projets générés. De plus, aucune corrélation n'a été établie entre la charge cognitive et la qualité des projets.

Abstract

The thesis discusses the impact of design media upon architectural design. Based on a multidisciplinary literature review, the objective of the thesis is to analyze the impact of three media, namely the freehand sketch, the physical model and the software (here, Sketch-UP 7.0) on architectural design.

35 students in architecture have participated in the study. A mixed evaluation methodology is proposed to evaluate the impact, namely quantitative measures of visual-spatial abilities (psychometric test), and the cognitive load management (secondary task technique) during the design, and also qualitative measures to evaluate the cognitive load management (NASATLX) and the quality of projects generated (consensual assessment technique).

The results show no significant statistical difference between the three media for the cognitive load management, and the project quality. Furthermore, no correlation was found between the cognitive load management and the project quality.

Remerciements

Ce travail de longue haleine a nécessité une remise en question et une rigueur constante au cours de sa rédaction. Il a suscité en moi une réflexion et un esprit d'analyse critique qui ne peuvent être que bénéfiques sur le long terme. La découverte de nouveaux domaines de connaissances (psychologie et ergonomie cognitive) a rendu cette expérience enrichissante et stimulante.

Sur le plan académique, je tiens à remercier chaleureusement Pierre, mon directeur de recherche pour sa patience, sa diligence et ses bons conseils qui ont souvent permis de réorienter ma recherche et de circonscrire mes objectifs. Des discussions sans concessions qui ont pu me guider à travers ces années de recherche. Aussi, je souhaiterais le remercier pour le soutien financier obtenu grâce au financement du CRSNG pour le programme de recherche dans lequel s'inscrit cette thèse. Ma participation à des conférences nationales et internationales ont permis l'émergence de questionnements qui ont enrichi cette recherche et ont contribué à une diffusion des objectifs de notre programme de recherche.

Un grand merci à Nathalie pour avoir accepté de m'encadrer en plein milieu de thèse. J'ai appris énormément en discutant avec toi sur la créativité et les activités cognitives et ce fut un plaisir constant de partager des connaissances, des échanges et une amitié durable, je l'espère. Merci aussi pour le soutien financier qui a facilité ma participation à des conférences.

Je tiens également à remercier Sébastien Tremblay qui m'a introduit à la psychologie cognitive et son application au domaine de l'architecture. Son pragmatisme, sa passion et les ressources matérielles et humaines qu'il a mis à ma disposition ont largement contribué à la réussite de cette recherche. Merci à l'équipe de Co-DOT pour leur aide, surtout en statistiques. Leur soutien fut essentiel à la bonne conduite de cette thèse.

Enfin, une pensée à M. Jean-Charles Lebahar que j'ai eu l'honneur de cotoyer et rencontrer à quelques reprises en début de thèse et qui m'a permis d'affiner mon analyse du processus de conception.

Je remercie aussi les étudiants qui ont participé à cette recherche exigeante. Ils ont été patients et d'une flexibilité exemplaire pour me permettre de mener à bien cette étude. Merci aussi aux évaluateurs qui ont pris de leur temps précieux pour m'aider à finaliser une partie importante de cette thèse.

Sur le plan personnel, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien indéfectible malgré la distance et les années. Merci à Papa, Adib, Nag, Nado, Youman et Shouhra! Au Québec, mes amis et collègues de travail pour m'avoir accordé le temps pour raconter mes expérimentations et mes doutes: Merci à Fred, Christian, André, David, Daniel & Guillaume et Claude. Merci à Nabila pour son soutien de tous les jours, pour les discussions interminables sur les méthodes qualitatives, quantitatives et mixtes; des sujets de discussions et de querelles insondables! Enfin merci à Nicolas pour sa constance, sa présence et ses multiples relectures et traductions!

à ma mère,

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Remerciement.....	iii
Table des matières.....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Introduction générale.....	1
1. Motivations et problématiques.....	1
2. Objectifs.....	4
3. Hypothèses et questions de recherche.....	6
4. Organisation de la thèse.....	7
PARTIE I.....	9
ÉTAT DE L'ART.....	9
Chapitre 1.....	11
Approche cognitive de la conception architecturale.....	11
1.1 Cognition, créativité et conception architecturale.....	11
1.1.1 Psychologie cognitive et systèmes mnésiques.....	12
1.1.2 La créativité : définitions et modèles théoriques.....	16
1.1.2.1 Rappel historique de la notion de créativité.....	16
1.1.2.2 Pour une définition consensuelle de la créativité.....	19
1.1.2.3 Les modèles théoriques de la créativité.....	20
1.2 La conception architecturale comme processus de résolution de problèmes.....	28
1.2.1 Processus de résolution de problèmes.....	30
1.2.2 Les modèles théoriques de la conception architecturale.....	32
1.2.3 L'idéation architecturale : une phase récurrente du processus de conception.....	34
1.3 Synthèse.....	37
Chapitre 2.....	39
Idéation architecturale et représentation.....	39
2.1 Les représentations internes.....	40
2.1.1 L'imagerie mentale.....	40
2.1.1.1 Les caractéristiques des images mentales.....	41
2.1.1.2 L'imagerie mentale et la conception architecturale.....	43
2.1.2. La charge cognitive.....	45
2.1.2.1 Définition de la charge cognitive.....	46
2.1.2.2 Charge cognitive et conception architecturale.....	47
2.2 Les représentations externes: les media d'aide à la conception.....	48
2.2.1. Les media tangibles.....	50
2.2.2.1 Les esquisses à main levée.....	51
2.2.2.2 Les maquettes.....	52
2.2.3 Les « CAD » (logiciels 3D).....	54
2.2.3.1 Les caractéristiques des logiciels 3D.....	56
2.2.3.2 Influence des medias numériques sur le processus de conception.....	59
2.3 Synthèse : proposition d'un modèle cognitif de la conception architecturale.....	61

Chapitre 3	65
Opérationnalisation du modèle cognitif de la conception architecturale	65
3.1 Les principales caractéristiques du concepteur	65
3.1.1 Experts versus novices	66
3.1.2 Les capacités visuo-spatiales.....	69
3.2 Le processus : mesures de la charge cognitive et de l'imagerie mentale	73
3.2.1 Les mesures de la charge cognitive.....	73
3.2.1.1 Les mesures qualitatives.....	74
3.2.1.2 Les mesures quantitatives.....	75
3.2.1.3 L'oculométrie comme mesure de la charge cognitive	76
3.2.1.4 Combinaison des mesures de la charge cognitive.....	78
3.2.2 L'imagerie mentale et sa mesure.....	80
3.2.2.1 Les mesures qualitatives de l'imagerie mentale.....	80
3.2.2.2 Les mesures quantitatives de l'imagerie mentale.....	84
3.3 Évaluation des artéfacts (Products)	88
3.4 Évaluation de l'influence des media d'aide à la conception	91
3.5 Résumé	94
PARTIE II	97
L'EXPÉRIMENTATION	97
Chapitre 4 : Méthodologie.....	99
4.1 Proposition d'une méthodologie mixte	99
4.2 Questions de recherche.....	102
4.3 L'expérimentation	104
4.3.1. Protocole expérimental.....	105
4.3.2. Échantillon	105
4.3.3. Procédures	105
4.3.4. Le matériel.....	109
4.3.4.1. Les types de media de conception.....	109
4.3.4.2. Le concepteur	110
4.3.3.3. Le processus de conception : Gestion de la charge cognitive	114
4.3.4.4 Le processus de conception : l'imagerie mentale.....	118
4.3.4.5 Évaluation des projets	118
4.4. Analyse des données	121
4.5. Résumé	122
Chapitre 5 : Présentation des résultats.....	123
5.1 Participants	123
5.2 Préférence et maîtrise des media d'aide à la conception.....	124
5.3 Les capacités spatiales du concepteur	128
5.4 La gestion de la charge cognitive durant le processus de conception	131
5.4.1 Mesures quantitatives de la gestion de la charge cognitive	132
5.4.2 Mesure qualitative de la charge cognitive.....	135
5.4.3 Résultats de la pupillométrie	136
5.4.4 Relation entre les mesures de la charge cognitive et les capacités spatiales ...	138
5.5 Résultats de l'imagerie mentale	139
5.6 Évaluation des productions	141
5.6.1 Accord inter-juges	141

5.6.2 Comparaison des évaluations des projets	143
5.6.3 Corrélation entre les évaluations de la qualité des projets.....	147
5.6.4 Corrélation entre la charge cognitive et l'évaluation des projets.....	149
5.6.5 Corrélation entre les capacités spatiales et les évaluations des productions.....	150
5.7 Résultats des questionnaires	151
5.8 Résumé.....	152
Chapitre 6 : Discussion	155
6.1 Discussion relatives aux questions de recherche	155
6.1.1 Quel est le media de conception privilégié pour l'idéation?	156
6.1.2 Quel est le lien entre la maîtrise des media de conception et les capacités spatiales du concepteur?	157
6.1.3 Les capacités spatiales ont-elle une incidence sur la charge cognitive des concepteurs selon le medium utilisé ?	158
6.1.4 Les capacités spatiales sont-elles corrélées à l'évaluation de la qualité des projets générés?.....	162
6.1.5 Le type de medium de conception impose-t-il une charge cognitive additionnelle au concepteur ?	162
6.1.6 Le type de medium a-t-il une incidence sur la qualité des projets générés?.....	164
6.1.7 Existe-t-il un lien entre charge cognitive et qualité des projets générés.....	166
6.2 Réflexion sur la méthodologie proposée	166
6.2.1. L'intérêt de la méthodologie mixte.....	166
6.2.2 Limites de la recherche et travaux futurs.....	168
Conclusions.....	173
Bibliographie	179
ANNEXES.....	197
ANNEXES 1 : Présentation des projets.....	198
ANNEXES 2 : Consignes pour les participants.....	207
ANNEXES 3 : Consignes pour les évaluateurs	208
ANNEXES 4 : Tests des capacités spatiales (Elkstrom et al., 1976)	210
ANNEXES 5 : Questionnaire NASATLX.....	216
ANNEXES 6 : Questionnaire profil du participant	218
ANNEXES 7 : Questionnaire post-expérimental	220
ANNEXE 8 : Corrélation entre la maitrise des media et la charge cognitive	224
ANNEXE 9 : Article publié à CAADFutures'11	226

Liste des figures

Figure 1 : Description du contenu de la première partie.....	9
Figure 2 : Schéma relationnel sommaire des concepts utilisés.....	12
Figure 3 : le système de traitement de l'information humain	14
Figure 4 : Le modèle des 4P de Rhodes.....	21
Figure 5 : Modèle de la pensée créative (Wallas, 1926).....	21
Figure 6: Modèle de l'approche multivariée de la créativité	24
Figure 7. La boîte noire (à gauche) et la boîte de verre (à droite).	29
Figure 8 : Modèle de Zeisel (2006)	32
Figure 9: le cycle Exploration-Génération-Évaluation.....	36
Figure 10: Description schématique de la liberté de conception	37
Figure 11: Proposition d'un modèle cognitif de la conception architecturale.....	63
Figure 12 : Modèle hiérarchique des capacités spatiales selon Lohman	71
Figure 13 : L'expérimentation de Yarbus (1967)	76
Figure 14 : Exemple de graphes d'idées (Bilda & Gero, 2008)	84
Figure 15: Opérationnalisation du modèle théorique	95
Figure 16 : Synthèse des questions de recherche.....	104
Figure 17: L'environnement expérimental	109
Figure 18: les trois media utilisés par les participants.....	110
Figure 19 : Aperçu du test de rotation de cartes	112

Figure 20: Aperçu du test de Pliage de Papier	113
Figure 21: Exemple du Test de Figures Enchâssées de Witkin et al. (1971).....	114
Figure 22: Description et matériel de la tâche secondaire	115
Figure 23 : Le système Mobile Eye et son enregistreur vidéo	118
Figure 24: Échantillon de projets tel que soumis aux juges.....	120
Figure 25: Description de l'échantillon.....	124
Figure 26: Description des préférences des media d'aide à la conception.....	125
Figure 27: Description des media utilisés par les participants selon le cycle d'étude	125
Figure 28: Description de la maîtrise des media de conception par les participants.....	126
Figure 29: Anova à mesures répétées du taux de sensibilité.....	133
Figure 30 : Graphique représentant le temps de réaction par medium de conception	134
Figure 31: Diagrammes de dispersion entre les mesures de la charge cognitive et les trois media de conception.....	135
Figure 32 : Nuage de points du NASATLX.....	135
Figure 33 : Nuage de points pour les six dimensions du NASA TLX	136
Figure 34 : Nuage de points selon les critères d'évaluation des évaluations des projets en fonction des trois media de conception	146

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modèles théoriques des processus cognitifs (Howard et al., 2008).....	22
Tableau 2 : Forces et faiblesses des mesures de la charge cognitive choisies.....	80
Tableau 3 : Organisation des sessions expérimentales	106
Tableau 4 : Déroulement des sessions expérimentales.....	108
Tableau 5 : Perception de la maîtrise des media de conception selon le genre et le cycle d'étude	127
Tableau 6 : Statistiques descriptives des résultats des tests de capacités spatiales selon le genre.....	129
Tableau 7 : Test t d'échantillons indépendants comparant les scores des tests de capacités spatiales selon le genre	129
Tableau 8 : Statistiques descriptive des résultats des tests de capacités spatiales selon le cycle d'études	130
Tableau 9 : Test t d'échantillons indépendants comparant les scores des tests de capacités spatiales selon le cycle d'études	130
Tableau 10 : Corrélations entre la maîtrise des media de conception et les tests de capacités spatiales.....	131
Tableau 11 : statistiques descriptives pour la sensibilité.....	132
Tableau 12 : statistiques descriptives des temps de réaction.....	133
Tableau 13 : Résultats des mesures de la dilatation des pupilles (en pixels).....	137
Tableau 14 : Corrélations entres capacité spatiale et charge cognitive	138

Tableau 15 : Résultats du nombre et de la durée de fixations.....	140
Tableau 16: Résultats de l'accord inter-juges	143
Tableau 17 : Statistiques descriptives des critères d'évaluation selon les média.....	144
Tableau 18 : Statistiques descriptives des critères d'évaluation selon les média et le cycle d'études	144
Tableau 19 : Moyennes des évaluations par medium	147
Tableau 20 : Corrélations de Pearson des critères d'évaluation selon les média.....	149
Tableau 21 : Correlations entre charge cognitive.....	150
Tableau 22 : Corrélations de Pearson entre capacités spatiales et évaluations des projets	150

Introduction générale

La conception architecturale est un domaine de complexités et de contingences. L'activité de conception est régie par une multitude de contraintes conceptuelles, légales et techniques s'influençant mutuellement que l'architecte doit gérer durant les différentes phases du projet (Lawson, 2005). Par ailleurs, les concepteurs sont confrontés à des opportunités (Visser, 2006) où l'émergence d'idées au cours de leur activité contribuent ou non à la solution finale retenue. Dans ce contexte, le rôle des media d'aide à la conception est central lors de ce processus (Mitchell, 2003; Kallay, 2004) puisqu'il facilite, entre autres, en fonction des potentiels de chaque medium, la gestion des contraintes et l'émergence de ces idées. Il y aurait donc une relation entre le medium et l'activité de conception qu'il reste néanmoins à valider et mesurer expérimentalement avant de pouvoir généraliser l'incidence des media sur la conception et la qualité du projet.

1. Motivations et problématiques

La recherche dans le domaine des études cognitives en conception (« *cognitive design studies* ») se développe depuis les années 60. Mais une recrudescence dans les années 90, est marquée par une augmentation du nombre d'articles qui en traitent dans des revues, telle que Design Studies ou les colloques et actes de colloques qui lui sont dédiés, tel que Design Cognition and Computing. Une analyse bibliométrique réalisée par Chai et Xiao (2012) sur les thèmes de recherche abordés au cours des 15 dernières années (1996-2010) dans la revue Design Studies indique que les deux thèmes les plus étudiés sont le processus de conception et les études cognitives sur la conception (« *design cognition* »).

Les recherches cognitives sur la conception s'intéressent au concepteur, à la tâche de conception mais aussi à l'évaluation des artefacts générés durant cette tâche (Lebahar, 2007). Ces différentes recherches, comme la présente, s'intéressent plus particulièrement à la phase d'idéation qui se définit par la première phase de génération et de développement des idées. Cette phase est censée être la plus « créative » (Ullman, 2003). De plus, à l'échelle professionnelle, même si cette phase ne représente que 15% des honoraires

professionnels en architecture et incidemment 15% de la durée de réalisation du projet¹, elle est déterminante pour le développement et le coût du projet. L'étude de cette phase d'idéation est donc théoriquement et financièrement particulièrement intéressante et pertinente à réaliser.

Une recension de la littérature en psychologie de la créativité a permis d'établir l'importance du modèle des quatre P (Rhodes, 1961; Runco, 2004). Selon ce modèle, le concepteur (« Person »), le processus de conception (« Process »), les artéfacts (« Products ») et l'environnement matériel et social (« Place ») devraient constituer les paramètres d'analyse de toute activité de conception, incluant l'architecture. Ces quatre paramètres sont (1) le concepteur, (2) le processus de conception, (3) l'artéfact et (4) l'environnement.

En effet, en amont, il y a le concepteur et ses spécificités (connaissances, capacités visuo-spatiales, style cognitifs, traits de personnalité, motivation, etc.) qui peuvent influencer le processus de conception. Durant la génération des idées, le concepteur interagit et crée des représentations externes via un ou plusieurs media. Ses capacités cognitives (ses capacités spatiales par exemple) peuvent influencer cette interaction et par conséquent avoir une incidence sur le processus de génération des solutions et in extenso sur la solution elle-même.

Quant au processus de conception. Selon l'approche cognitive, il est défini comme correspondant à la résolution de problèmes mal définis, a été longuement étudié et plusieurs modèles ont été présentés (Simon, 1974; Zeisel, 1984; Prost, 1992). Caractériser la conception uniquement comme un processus de résolution de problèmes est un discours essentialiste limité. Comme le mentionne Lebahar (2005, p.5), il peut paraître plus adapté de parler de tâche de conception, plutôt que de problèmes mal définis, soit une tâche « *composée de plusieurs problèmes, multiformes et multidomaines que comme un problème unique* ». Ainsi, la tâche de conception se traduit par un dialogue constant entre des représentations internes et externes. Par représentations internes, on désigne les processus et activités cognitives mis en œuvre lors de la tâche de conception, tels que l'imagerie mentale, la mémoire ou encore la prise de décision. La présente recherche s'intéresse, entre

¹ Selon le manuel canadien de la pratique de l'architecture et l'Ordre des Architectes du Québec.

autres, à la gestion de la charge cognitive requise durant le processus de conception. Plusieurs auteurs (Athavankar, 1997; Bonnardel, & Piolat 2003; Bilda, 2006; Bilda & Gero 2008) rappellent l'importance de la charge cognitive durant l'activité de conception. Ainsi, la littérature en psychologie cognitive (Baddeley, 2003) fait ressortir les capacités limitées de la mémoire de travail par lesquelles sont générées et développées les idées de conception. Si cette mémoire de travail est saturée, cela entraînerait une surcharge cognitive chez le concepteur, qui éprouverait une difficulté à gérer et développer ses idées; ce qui aurait une réelle incidence sur le processus de conception et la qualité des projets générés. D'où l'importance des représentations externes et des media d'aide à la conception (Esquisse, logiciels, maquette, etc.) qui auraient pour but de réduire cette charge cognitive (Bilda, 2006). Or chaque medium présente des spécificités et des potentialités différentes qui peuvent influencer différemment la charge cognitive du concepteur. À notre connaissance, aucune recherche précédente n'a étudié le lien entre la charge cognitive du concepteur et le médium qu'il utilise.

En aval du processus de conception, l'évaluation de la qualité des artéfacts générés, les projets architecturaux, demeure aussi un sujet d'étude important. En effet, l'étude de la qualité des projets générés peut informer sur la tâche de conception et les processus impliqués. Des travaux récents (Demirkan & Afacan, 2011; Sarkar & Chakrabarti, 2011) proposent de nouvelles méthodes pour évaluer la qualité des projets générés.

Enfin, à notre connaissance, l'environnement social des concepteurs n'est pas un sujet d'étude développé. Les recherches dans le domaine de la conception architecturale se sont davantage centrées sur l'environnement matériel de conception soit les media utilisés. Pour saisir l'incidence que peut avoir un outil sur le travail du concepteur, il faut comprendre les interactions complexes auxquelles doit faire face un concepteur dans une situation de conception spécifique. Dans ce contexte, la compréhension des activités cognitives est essentielle car elle permet de proposer des outils d'assistance adaptés, voire d'aide à la décision, coopérant avec le concepteur tout au long du processus. «Quand il s'agit de développer des systèmes interactifs d'assistance au concepteur, la connaissance du comportement cognitif du concepteur humain est bien évidemment d'une importance fondamentale, car l'utilisateur du système interactif (c'est-à-dire le concepteur) doit pouvoir l'utiliser dans un environnement cognitif adéquat.» (Cross, 2005, p.45). Par

ailleurs, la recherche sur les media d'aide à la conception s'est surtout concentrée sur les études d'esquisses « à main levée » réalisées durant la phase conceptuelle. En outre, malgré l'informatisation de la pratique architecturale, peu de recherches ont étudié le processus de conception tel qu'il est mis en œuvre par l'utilisation des outils numériques. La raison invoquée, les esquisses sont la plupart du temps considérées comme le medium par excellence pour l'exploration des idées, alors que les croquis numériques sont supposés ne pas « soutenir » la créativité lors de la phase d'idéation (Goel, 1995; Do & al. 2001). Cependant, certains chercheurs s'interrogent sur la prévalence et l'intuitivité de l'esquisse pour concevoir un bâtiment. Après avoir mené des expériences dans deux écoles en Europe, Knight et al. (2005) arrivent à la conclusion que la conception architecturale sur la base d'esquisses est le résultat d'un apprentissage (et n'est pas « inné »), exactement comme la conception au moyen de l'ordinateur. Certaines études (Dorta, 2001; Bilda & Dermirkan, 2003; Madrazo, 1999) ont suggéré que des représentations visuelles numériques peuvent être employées pour une meilleure compréhension des formes et comme soutien de la pensée visuelle. Le potentiel des différents media d'aide à la conception et leur incidence sur le processus demeure cependant un domaine de recherche peu étudié expérimentalement. Celles existantes sont principalement de nature qualitative et réalisés auprès de faibles échantillons de participants, rendant difficile la généralisation des résultats obtenus.

Une revue de la littérature multidisciplinaire portant sur ces quatre paramètres (les 4P) et des problématiques soulevées par les chercheurs dans le domaine de la conception nous ont permis de préciser les objectifs de la présente recherche.

2. Objectifs

L'objectif principal de la thèse est de développer et de valider une méthodologie mixte d'évaluation quantitative et qualitative de l'incidence des media utilisés lors du processus de conception architecturale, plus spécifiquement durant la phase d'idéation, tout en analysant et documentant cette incidence, tenant compte des aspects liés aux quatre paramètres du modèle de Runco. Ainsi, de prendre en compte : (1) le concepteur, ses préférences, sa maîtrise des media de conception et ses capacités visuo-spatiales qui sont

essentielles à l'architecte (Ho, 2006; Yulhina, 2007); (2) la gestion de la charge cognitive requise lors de la mise en œuvre des processus cognitifs impliqués durant la tâche de conception (imagerie mentale, prise de décision, etc.); (3) la qualité des projets (artéfacts) générés et enfin, (4) les potentiels et faiblesses de trois différents media d'aide à la conception utilisés traditionnellement à la fois dans les milieux académique et professionnel, à savoir l'esquisse à main levée, la maquette et le logiciel 3D (Sketch-Up, version 7). Par ailleurs, la perception des concepteurs sur leurs préférences, leurs maîtrises et usages des media peut aider à la compréhension du phénomène étudié.

Pour atteindre cet objectif, une méthodologie mixte est proposée. Une démarche méthodologique est qualifiée de mixte lorsque le chercheur combine des données et des méthodes quantitatives et qualitatives dans une même étude (Johnson & Onwuegbuzie 2004). Les chercheurs favorables à la méthode mixte mettent en avant son pragmatisme (Karsenty, 2006 ; Teddlie et Tashakkori, 2009). Ils indiquent que les choix méthodologiques devraient être déterminés par les objectifs et les questions de recherche plutôt que par des postures épistémologiques. C'est ce pragmatisme méthodologique qui a dicté l'utilisation de la méthode mixte dans le cadre de la présente recherche. En effet, selon l'objectif principal énoncé et la complexité du processus de conception et des différents paramètres à considérer, l'usage de la méthode mixte s'impose : des données d'ordre qualitative (mesure qualitative de la charge cognitive, préférence et maîtrise des media de conception, évaluation qualitatives des projets, perception des concepteurs) et quantitatives (capacités visuo-spatiales, charge cognitive) sont collectées et analysées. Pour Karsenty (2006, p.4), l'intérêt de la méthode mixte de recherche est de « facilite[r] la triangulation des résultats de recherche : l'utilisation de diverses méthodes pour s'assurer de la rigueur des conclusions formulées par un chercheur à partir de différentes données de recherche est fort prometteuse. » Notre étude est donc intermédiaire aux recherches précédentes dans le domaine de la conception; puisque tous les auteurs consultés dans le cadre de notre recension des écrits ont essentiellement adoptés une méthode qualitative utilisant, des observation, des entretiens, des analyses de protocoles verbaux et d'encodage des esquisses (Goel 1995; Suwa & Tverski, 1997; Rosenman & Gero, 1998; Lawson, 2006; Lebahar, 2007). Les résultats de ces recherches qualitatives, basés sur de faibles

échantillons, permettent d'émettre des hypothèses de recherches mais leurs résultats ne peuvent être généralisés. Je souhaite apporter une contribution à ces précédents travaux en me basant aussi bien sur des mesures qualitatives (e.g. questionnaire sur l'usage des media, questionnaire subjectif de la charge cognitive) que sur des mesures quantitatives (e.g. la gestion de la charge cognitive, les capacités visuo-spatiales). Cette complémentarité des mesures devrait permettre de répondre aux questions et hypothèses de recherche énoncées ci-dessous.

3. Hypothèses et questions de recherche

L'hypothèse de notre recherche est que les media d'aide à la conception ont une incidence sur le processus de conception et son résultat, c'est-à-dire sur la qualité du projet généré. Plus précisément, l'esquisse est le medium qui influence le plus la phase d'idéation et la performance des concepteurs (Goel, 1995; Do & al. 2001, Stones et Cassidy, 2005). Afin de valider cette hypothèse de recherche, plusieurs questions de recherche sont soulevées et regroupées en fonction de trois des quatre paramètres précités (concepteur-processus-artéfacts) en lien avec la variable indépendante considérée, le medium (le quatrième paramètre) :

1. Le concepteur

1.1 Les capacités visuo-spatiales des concepteurs peuvent-elles influencer la gestion de la charge cognitive durant la tâche de conception?

1.2 Les capacités visuo-spatiales sont-elles corrélées à la qualité des projets générés ?

1.3 Quelle est le medium privilégié par des participants-concepteurs durant leur tâche de conception ?

2. La charge cognitive requise durant le processus de conception :

2.1 Le type de medium utilisé durant la tâche de conception impose-t-il une charge cognitive additionnelle au concepteur ?

2.2 La gestion de la charge cognitive durant la tâche de conception influence-t-elle la qualité du projet généré ?

3. L'évaluation de la production

3.1 Le type de medium a-t-il une incidence sur la qualité du projet généré ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, les données recueillies font l'objet d'analyses statistiques.

4. Organisation de la thèse

La thèse est composée en deux parties. La première partie concerne le cadre théorique et la seconde présente l'expérimentation et les résultats obtenus. Ainsi, la première partie recoupe les trois premiers chapitres :

- Le Chapitre 1 présente l'approche cognitive à la créativité et la conception architecturale utilisée dans le cadre de cette recherche. Les modèles théoriques en psychologie cognitive et en créativité y sont introduits.
- Le chapitre 2 porte sur le concept de représentation, et souligne son importance pour le processus de conception architecturale et la manière dont le dialogue entre les représentations internes et externes influence ce processus. Un modèle théorique illustre la mise en relation des concepts abordés.
- Le chapitre 3 expose les méthodes d'évaluation et de mesures des composantes du modèle théorique avancé afin d'en proposer une opérationnalisation.

La seconde partie de la thèse présente l'expérimentation, les résultats et leur discussion :

- Après un rappel des hypothèses et des questions de recherche, le chapitre 4 présente le protocole expérimental ainsi que le matériel et les procédures employés dans le cadre de cette recherche.
- Le chapitre 5 présente les résultats statistiques des différentes mesures réalisées pour évaluer les capacités visuo-spatiales des participants, la gestion de leur charge

cognitive ainsi que la qualité des projets générés. Des analyses de corrélations entre ces mesures sont aussi présentées.

- Le chapitre 6 est consacré à la discussion des résultats obtenus en relation avec le cadre théorique. De plus, la dernière partie de ce chapitre permet d'aborder les difficultés rencontrées ainsi que les limites de la recherche.

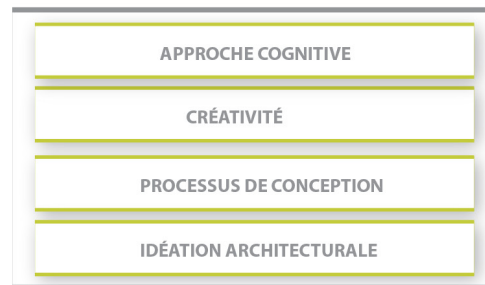
Enfin, il est important de mentionner que la thèse fait partie d'un programme de recherche intitulé « Proposition d'une méthode quantitative pour évaluer l'incidence d'un médium de conception sur la tâche d'idéation » et subventionné par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG) du Canada. Ce programme de recherche qui a des objectifs qui englobent ceux de la présente thèse, propose des concepts et des mesures (imagerie mentale, styles cognitifs) qui sont mentionnés dans la thèse mais qui ne sont ni discutés, ni analysés.

PARTIE I

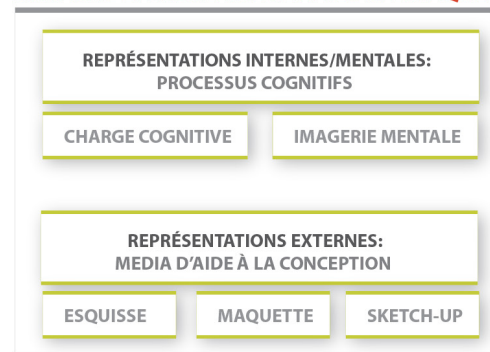
ÉTAT DE L'ART

Cette première partie théorique a pour objectif de présenter les différents domaines de recherche et les concepts-clés utilisés dans la présente thèse. Trois chapitres structurent cette partie : le premier introduit la créativité d'un point de vue cognitif ainsi que le processus de conception architecturale; alors que le second chapitre s'intéresse plus spécifiquement aux interactions et au dialogue entre les représentations internes et externes durant ce processus. La synthèse de ces deux chapitres nous permet de proposer un modèle théorique qui met en relation les principaux concepts définis précédemment. Enfin, le troisième chapitre a pour objectif d'opérationnaliser ce modèle. La figure 1 présente le contenu des trois chapitres.

CHAPITRE 1: CADRE CONCEPTUEL GÉNÉRAL



CHAPITRE 2: CADRE CONCEPTUEL SPÉCIFIQUE



CHAPITRE 3: OPÉRATIONNALISATION DU MODÈLE THÉORIQUE

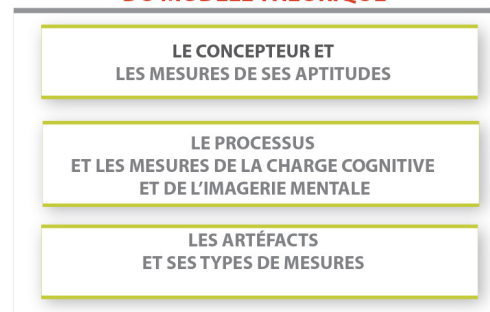


Figure 1 : Description du contenu de la première partie

Chapitre 1

Approche cognitive de la conception architecturale

1.1 Cognition, créativité et conception architecturale

L'architecture est un processus consubstantiellement créatif. Les problèmes de conception non routiniers requièrent de la créativité; ce qui implique que le concepteur doit user de sa créativité pour faire appel à des stratégies novatrices et créatives durant le processus de conception; et ce, afin de parvenir à des solutions architecturales satisfaisantes. En effet, lors des différentes phases du processus d'idéation, la créativité joue un rôle majeur dans l'interaction avec le problème de conception mais aussi dans l'élaboration, la réalisation et la présentation des solutions architecturales (Bonnardel, 2009). Selon le point de vue de la psychologie cognitive, la conception architecturale est un processus cognitif de haut niveau de résolution de problèmes (Matlin, 2001) dont la principale particularité est d'être mal définis (Simon, 1974).

L'objectif de ce chapitre est de définir et de mettre en relation les principales notions énumérées ci-dessus : créativité, processus de conception et idéation. Après une brève introduction à la psychologie cognitive et ses modèles, les notions de créativité, de processus de conception et d'idéation architecturale sont définies (cf. figure 2).

Il est nécessaire de rappeler que la présente thèse en conception architecturale constitue une recherche exploratoire qui aborde plusieurs paradigmes et débats théoriques de diverses disciplines (psychologie et ergonomie cognitive, psychologie de la créativité, conception architecturale). Notre ambition n'est pas de détailler les différents concepts utilisés, mais de présenter succinctement et avec concision ces derniers, ainsi que les liens qu'ils entretiennent pour établir un état de l'art approprié compte tenu des thématiques abordées dans ce travail.

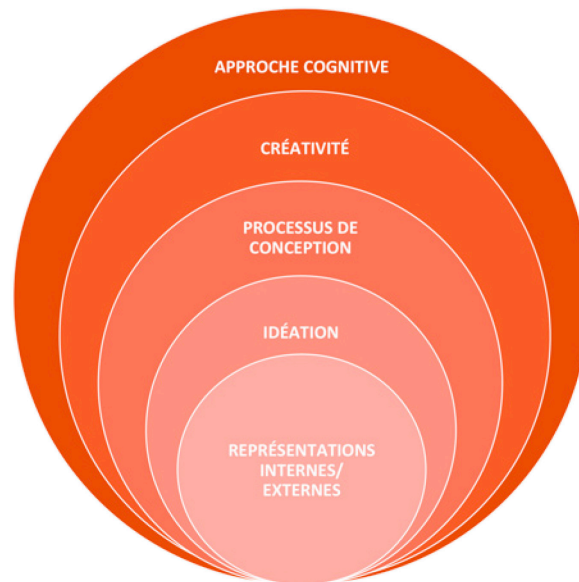


Figure 2 : Schéma relationnel sommaire des concepts utilisés

1.1.1 Psychologie cognitive et systèmes mnésiques

La psychologie cognitive a pour objectif de comprendre comment les individus pensent et raisonnent par l'étude aussi bien de leurs comportements manifestes (telles que les activités motrices et verbales) que de leurs comportements non manifeste (tels que la perception, l'attention, le raisonnement, la résolution de problèmes, etc.) (Matlin, 2001). Costermans (2001, p.12) définit ces comportements comme « un ensemble d'opérations par lesquelles l'individu, au départ de l'information sensorielle, élabore des représentations et effectue des transformations sur ces représentations, pour finalement les utiliser dans la mise en place des comportements manifestes ». On parle alors d'opérations cognitives ou de processus cognitifs/mentaux². Durant leurs tâches de conception, les architectes font usage de ces processus cognitifs de manière consciente ou inconsciente.

L'étude de ces processus cognitifs n'a pas toujours été aussi évidente puisqu'ils sont difficilement observables. Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XXème siècle que la psychologie accorde une place déterminante à l'analyse de ces opérations cognitives. Depuis les années 60, l'approche du système de traitement de l'information (STI) demeure

² Dans la littérature, les termes « processus cognitifs » ou « processus mentaux » sont utilisés indistinctement selon les auteurs pour faire références aux opérations cognitives qui se font mentalement. Dans le cadre de cette thèse, dans un souci de clarté, seule l'expression « processus cognitif » sera employée.

la référence en psychologie cognitive; cette approche admet le caractère séquentiel des processus mentaux (Fortin & Rousseau, 1993). La présente recherche se base sur cette approche structuraliste du STI. En outre, compte tenu de l'importance des processus mnésiques dans l'activité des architectes, notamment pour développer leurs images mentales et les stocker, la section suivante traitera de ces processus.

Un des premiers modèles du traitement de l'information est celui développé par Atkinson et Shiffrin en 1968, modèle qui a évolué par la suite mais qui reste l'un des plus cités dans la littérature sur les systèmes mnésiques. Selon ce modèle, il existe trois mémoires : (1) la mémoire sensorielle (MS) ou registre sensoriel, qui enregistre les informations/stimulis présents dans l'environnement (son, lumière, etc.). Le stimulus serait, si on y fait attention, identifié et introduit (2) dans la mémoire à court terme (MCT). Cette dernière va traiter le stimulus en puisant, entre autres, parmi les informations contenues dans (3) la mémoire à long terme (MLT). Fortin et Rousseau (1993) définissent la MCT comme l'ensemble des processus qui permettent de maintenir active l'information nécessaire à l'exécution des opérations cognitives courantes mais aussi le transfert de l'information à la MLT. Quant à cette dernière, c'est elle qui emmagasine les faits, connaissances et les habiletés accumulés au fil des expériences. Plusieurs processus de contrôle jouent des rôles majeurs pour permettre un emmagasinage plus permanent de l'information reçue en MLT tels que l'autorépétition ou la création d'images mentales. Les principales différences entre ces trois mémoires reposent sur la durée et la capacité d'emmagasinage de chacune (cf. figure 3). La capacité de stockage de ces mémoires est limitée dans le cas des MS et MCT et illimitée dans le cas de la MLT.

La MCT est le siège des traitements de l'information impliqués dans des activités d'imagerie mentale, de résolution de problèmes, de compréhension, de raisonnement, d'apprentissage, etc.. Elle contribue également à la gestion de ces traitements (Da Silva Neves, 1999). Baddeley (1976, 2000) a eu un impact important dans le domaine des systèmes mnésiques puisqu'il a effectué une description complète de la MCT, notamment en développant la notion de Mémoire de Travail (MT, « working memory »).

Selon cette approche, la MT serait composée d'un ensemble de processus relativement indépendants qui contribuent au travail exécuté en MCT (Fortin et Rousseau, 1993). Pour ces auteurs, la MCT permet la rétention de l'information pendant une durée brève alors que

la MT permet d'effectuer des traitements cognitifs sur les éléments qui y sont temporairement stockés. La MT est donc impliquée dans des processus faisant appel au raisonnement.

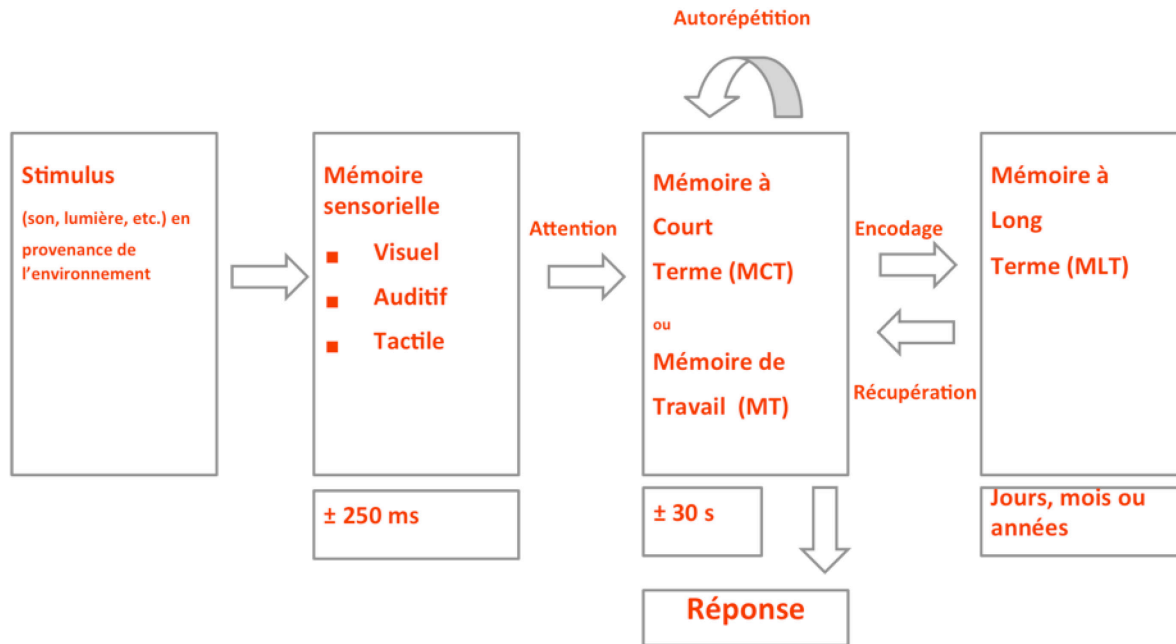


Figure 3 : le système de traitement de l'information humaine d'après Atkinson et Shiffrin (1968)

La MT est donc vue comme une composante active du STI où l'information nécessaire aux activités cognitives est activée. Cette mémoire de travail serait formée de trois modules:

- (1) L'administrateur central qui est un mécanisme attentionnel de contrôle et de coordination de deux systèmes esclaves. De capacité limitée, il aurait notamment pour fonction de sélectionner les stratégies cognitives, de coordonner les informations en provenance de différentes sources, de permettre la réalisation de deux tâches simultanément (Croize, 2001).
- (2) La boucle phonologique, le premier système esclave, permet le stockage des informations verbales (auditives ou visuelles). La boucle phonologique stocke pendant un laps de temps de 2 secondes environ un nombre limité d'informations sonores. Elle dispose d'un processus de contrôle articulatoire dit d'autorépétition subvocale qui permet de répéter mentalement des mots du registre phonologique et

permettrait de maintenir l'information en mémoire de travail ou de la transférer en mémoire à long terme (Matlin, 2001).

- (3) Le calepin visuo-spatial (« visuo-spatial sketchpad »), second système esclave, permet, le stockage des informations visuelles et spatiales (non verbales). Il gèrerait et coordonnerait les processus impliqués dans des tâches d'imagerie mentale et serait impliqué dans la génération et la visualisation des images mentales (Kosslyn, 1994; Logie, 1995). C'est ce composant qui permet d'accomplir les tâches de cognition spatiale. Toutefois, comme le rappelle Tyndiuk (2005), « de nombreuses données expérimentales, et neuropsychologiques (Baddeley, 1993; Logie, 1995; Smith & al., 1995; Logie & Pearson, 1997; Hecker & Mapperson, 1997), ont conduit des auteurs à proposer l'éclatement du calepin visuo-spatial en deux registres distincts : un registre spatial qui traiterai l'information spatiale ainsi que les relations entre les objets et un registre visuel qui traiterai les couleurs et les formes ». Ce calepin visuo-spatial, à l'instar de la boucle phonologique, a une capacité limitée. On revient au seuil des sept (\pm deux) éléments de Miller (Matlin, 2001).

Pour résumer, la mémoire de travail telle que la définissent Baddeley et Hitch représente un système permettant de stocker et de maintenir en mémoire à court terme des informations qui sont manipulées et utilisées lors de la réalisation de tâches cognitives comme celle de la résolution de problèmes (Croize, 2001).

Contrairement aux informations stockées dans la MS et dans la MCT/MT, les informations stockées dans la MLT ont une durée de vie qui peut être permanente. La MLT est le modèle de notre mémoire auquel on se réfère de manière intuitive, dans la vie de tous les jours. Cependant, des observations scientifiques montrent que la MLT engloberait différents types de mémoire. Endel Tulving, depuis les années 70, est le premier à avoir proposé un modèle structural de la MLT en deux systèmes mnésiques qu'il a développé davantage depuis. Une première distinction fondamentale oppose la mémoire procédurale à la mémoire propositionnelle ou déclarative : La *mémoire procédurale* est la mémoire du savoir-faire, elle recouvre les actions ou opérations physiques ou mentales qui sont requises pour l'accomplissement d'une tâche (Da Silva, 1999). La mémoire déclarative ou

représentationnelle est la mémoire du savoir, du « quoi ». Tulving (1983) a subdivisé cette dernière mémoire déclarative en deux : la *mémoire sémantique* et la *mémoire épisodique*. La mémoire sémantique contient essentiellement l'information nécessaire à l'utilisation du langage ; « c'est un répertoire structuré des connaissances qu'un individu possède sur les mots et leurs relations » (Matlin, 2001). La *mémoire épisodique* concerne les représentations des événements situés dans le temps et dans l'espace (le contexte) ; « c'est la mémoire du temps qui passe » (Da Silva, 1999).

Ces mémoires, sémantique et épisodique, sont « fonctionnellement distinctes mais très inter-reliées puisque ce sont des modes de représentation d'une même réalité » (Fortin et Rousseau, 1993). Ainsi, par exemple, la signification que nous pouvons donner au concept de créativité est sans aucun doute affectée par le contenu mnémonique épisodique résultant de notre expérience avec la conception créative.

Le modèle de STI tient une place importante dans la littérature en psychologie cognitive et constitue un préalable à la compréhension de plusieurs fonctions cognitives dites supérieures, entre autres, le processus de résolution de problèmes, qui est rattaché à la notion de créativité et dans le cadre de ce travail à la conception architecturale.

1.1.2 La créativité : définitions et modèles théoriques

L'architecture fait appel à des activités de conception créatives. En effet, l'objectif principal des architectes est la résolution de problèmes créatifs (non routiniers), qui génèrent l'élaboration de procédures nouvelles produisant des produits/projets (bâtiments) nouveaux et fonctionnels (Bonnardel, 2006; Ward & al., 1995). Cette section est consacrée à l'étude de la créativité et des modèles théoriques développés pour la caractériser. Ces modèles sont par la suite comparés aux modèles cognitifs adaptés à la conception architecturale.

1.1.2.1 Rappel historique de la notion de créativité

La notion de créativité a beaucoup évolué depuis l'antiquité. D'une approche mystique de l'antiquité que l'on retrouve dans des textes grecs et judéo-chrétiens du créateur habité par une force supérieure inspiratrice, on aboutit au siècle des lumières (XVIII^e siècle) à des débats philosophiques sur la nature de la créativité. Plus précisément, dans « Psychologie de la créativité », Lubart (2003) décrit l'évolution épistémologique de la créativité, un

résumé de cet historique est repris ci-dessous. À la fin du 19^{ième} siècle avec le développement de la psychologie comme science, le concept de créativité est étudié selon les règles de cette nouvelle science, en l'occurrence par l'introspection (Galton, 1879) ou l'analyse des comportements des créateurs dans le cadre du courant du Behaviorisme. Avec l'avènement de la psychanalyse, Freud (1950) suggère que les artistes créent afin d'exprimer leurs désirs inconscients. Cette approche psychanalytique de la créativité, également appelée « psycho-dynamique », est encore utilisée de nos jours. La théorie de la Gestalt (de la forme) développée au début du 20^{ième} siècle a aussi influencé les études sur la créativité en se basant sur le postulat que le tout (la forme) est supérieur à la somme des parties. L'exemple typique dans le domaine de la musique repris par les théoriciens de la gestalt est que la musique ou une symphonie représentent plus qu'une succession de notes.

À partir de la seconde moitié du 20^{ième} siècle, avec le développement de la psychologie cognitive, Guilford (1950 -1967) suggère que la créativité nécessite plusieurs capacités telles que la facilité à détecter les problèmes, des capacités d'analyse, d'évaluation et de synthèse, ainsi qu'une fluidité et flexibilité³ de la pensée. Pour cet auteur, la créativité s'appuie sur différentes opérations mentales, et tout particulièrement sur la pensée divergente, soit la capacité à trouver le maximum de solutions à partir d'un stimulus unique. C'est généralement Guilford (1968) qui est reconnu pour avoir marqué le début de la recherche contemporaine sur la créativité, en l'articulant avec le concept d'intelligence. Ainsi, la créativité « ferait appel à des aptitudes plutôt *divergentes* (produire beaucoup d'idées alternatives, les combiner, les réorganiser), alors que l'intelligence ferait plutôt appel à des aptitudes *convergentes* (déduire, analyser, trouver la bonne réponse) » (Lubart, 2003).

Un autre auteur-clé contemporain sur la créativité est Torrance qui pendant quatre décennies (1950 à 1990) va développer des tests psychométriques de la créativité à partir de cette notion de pensée divergente avancée par Guilford⁴. Une autre approche de la créativité dite « socio-psychologique » se développe dans les années 60. Des recherches expérimentales réalisées à l'IPAR (Institute of Personality Research and Assessment)

³ Guilford définit la fluidité comme la capacité à produire le plus d'idées/alternatives ; alors que la flexibilité est définie comme la capacité à transformer les idées et à disposer d'une ouverture d'esprit devant les problèmes (Runco, 2004).

⁴ Les travaux de Torrance et Guilford seront analysés dans la partie 2.3. Mesure de la créativité

relieront la notion de créativité aux traits de la personnalité, à la motivation, la prise de risque, la confiance en soi, etc.

À partir des années 1970, selon une approche cognitive de la créativité, plusieurs chercheurs démontrent que les découvertes des créateurs peuvent être expliquées par des processus cognitifs "ordinaires" mis en œuvre au cours de situations de résolution de problèmes "traditionnels". Les découvertes ne sont pas le fruit d'un sursaut soudain ou d'une illumination inconsciente, mais sont le résultat d'un long processus réflexif, requérant l'utilisation de connaissances particulières (Weisberg, 1986, 2006). Boden (1994), quant à elle, suggère que la créativité n'est pas mystérieuse et peut s'expliquer par des concepts de calcul utilisés en intelligence artificielle. Plus précisément, selon Ward et al. (1995), les connaissances antérieures jouent un rôle déterminant dans la créativité des individus, en ce sens que les productions sont rarement entièrement nouvelles. 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. Cette approche de la créativité ne fait pas l'unanimité et semble simplifier le processus créatif mais en fait, ce n'est pas le cas. Dire que la créativité est un processus cognitif ordinaire n'explique pas les liens entre les processus cognitifs en interaction lors du processus créatif. Toutes ces recherches expérimentales basées sur la psychologie cognitive suggèrent que certains processus sont plus importants que d'autres, dépendamment de la complexité de la tâche à effectuer mais il est aujourd'hui impossible d'affirmer comment les créateurs traitent l'information cognitivement, i.e. quel processus cognitif est le plus important et dans quelle mesure comparé aux autres processus intervenant dans la créativité.

Les recherches dans le domaine des études cognitives en conception (« cognitive design studies ») vont essayer de comprendre les différentes opérations cognitives (analogies, transformations spatiales, etc.) utilisées par un architecte pour trouver la solution satisfaisante (Visser, 2009, Karam, 2010). C'est cette approche de la créativité qui sera développée et utilisée pour la suite de la présente recherche.

Aujourd'hui, la littérature sur la créativité réfère à plusieurs modèles théoriques de la créativité qui font appel aux différentes approches mentionnées. Mais avant d'aborder ces modèles, il nous faut clarifier la définition de la créativité.

1.1.2.2 Pour une définition consensuelle de la créativité

Malgré l'évolution historique de la notion de créativité et l'existence de plusieurs modèles de la créativité, des débats terminologiques subsistent quant à la définition à donner à la créativité. Pour Csikszentmihaly (1996), il s'agit de la capacité à exprimer des idées inhabituelles (...); pour Gero (1996) c'est la capacité à briser les précédentes règles et ensuite à créer des idées et des produits inattendus; pour Weisberg (2006), le créateur doit intentionnellement produire des idées nouvelles; pour Bonnardel (2002, p.95), c'est « la capacité à produire une idée exprimable sous une forme observable ou à réaliser une production, qui soit à la fois novatrice et inattendue, et adaptée à la situation »; pour Plucker et Mackel (2010), c'est une interaction des aptitudes, processus et environnement par laquelle un individu produit une solution perceptible comme nouvelle et utile. Enfin, Sarkar et Chakrabarti (2008, 2011, p.349) qui ont analysé 160 définitions de la créativité, définissent cette dernière ainsi « Creativity occurs through a process by which an agent uses its ability to generate ideas, solutions or products that are novel and valuable. »

L'objectif de cette recherche n'étant pas de faire une analyse sémantique de ces définitions et d'autres non mentionnées ci-dessus, il apparaît néanmoins que la créativité dispose de caractéristiques distinctes et admises par la plupart des chercheurs. De nombreuses études qui ont porté sur la créativité (Amabile, 1996; Bonnardel, 2006; Lubart, 2003; Sternberg, 2004; Weisberg, 2006) ont fait émerger l'idée selon laquelle une production créative doit principalement être **innovante** et **adaptée**. Howard et al. (2008) qui ont proposé une revue de la littérature sur la définition de la créativité au cours des 20 dernières années, ainsi que Sarkar et Chakrabarti (2008), se sont aperçus que généralement, on en revient toujours aux deux caractéristiques clé de la créativité, soit la nouveauté et l'adaptabilité. Les chercheurs n'utilisent pas les mêmes termes mais, ainsi nouveauté et originalité sont souvent échangés; alors qu'adaptabilité est remplacée par utilité (« usefulness ») ou faisabilité ou encore réponse correcte (Amabile, 1996), qui a du sens ou valable dans le contexte de la création. Par nouveauté, on désigne l'originalité d'une proposition qui doit se distinguer de ce qui a déjà été réalisé par le créateur lui-même ou par d'autres personnes. Meneely et Portillo (2005) soulignent, que dans le domaine de la conception, la nouveauté et l'adaptabilité sont liées aux critères de « forme » et de « fonction ». La forme signifie que les concepteurs doivent créer des produits formellement

nouveaux et différents de ce qui a été fait jusqu'alors (notamment les aspects esthétiques). En outre, les concepteurs doivent développer des produits utiles, adaptés et fonctionnels, entre autres, qui répondent aux besoins des clients et des futurs utilisateurs, soit une réponse aux contraintes du programme architectural ou du cahier des charges.

1.1.2.3 Les modèles théoriques de la créativité

Il existe plusieurs approches de la créativité. Ainsi la créativité peut être décrite en fonction de son ampleur soit la Créativité « C-majuscule » et la créativité « c-minuscule » (Boden, 1994, Runco, 2004). La créativité « C-majuscule » correspondrait aux activités créatives majeures qui ont produit un impact important dans un domaine telles que les découvertes scientifiques d'Einstein, l'architecture de Mies Van der Rohe; alors que la créativité c-minuscule « s'observe dans les solutions inhabituelles que chacun peut produire dans sa vie quotidienne » (Lubart, 2003). Pour Bonnardel (2009), les activités de conception, se situent sur un continuum allant de la créativité majeure à la créativité mineure. Cela se vérifie pour l'architecture au niveau professionnel, où la quête de la nouveauté/originalité est sacrifiée, dans certains cas, au nom de la fonctionnalité et/ou du budget; dans ces cas, les architectes vont alors utiliser des procédures éprouvées en les modifiant sommairement pour répondre au programme architectural ou aux besoin des clients.

Dans le cadre de cette recherche, nous adopterons plutôt une taxonomie de la créativité dite des « 4P » proposé par Rhodes (1961); qui est largement reprise dans la littérature sur la créativité (Lubart, 2003; Runco, 2004; Kaufman & Weisberg, 2006; Sternberg, 2010). Ce modèle général (fig. 4) propose une classification qui met l'emphase sur 4 aspects de la créativité: la personne (« Person »), le processus (« Process »), le produit (« Product ») et enfin l'environnement (« Place »), soit le contexte dans lequel se déroule l'activité créative et l'environnement matériel utilisé pour concevoir (entres autres, les media d'aide à la conception). Simonton (1995) suggère que les 4P sont constitutifs à la créativité et qu'ils doivent donc être étudiés en tenant compte des quatre critères auxquels il en rajoute un cinquième P : la Persuasion, soit la capacité des créateurs à influencer et à persuader les autres de la valeur « créative » des produits qu'ils créent.

Runco (2004) en arrive à la même taxonomie après une recension de la littérature des 20 dernières années dans le domaine de la créativité, mais propose une hiérarchie entre

le potentiel créatif des individus, l'environnement et la performance créative. Pour Runco, des individus peuvent avoir un potentiel créatif et travailler dans un environnement qui incite à la créativité, mais cela ne garantit aucunement des solutions créatives.

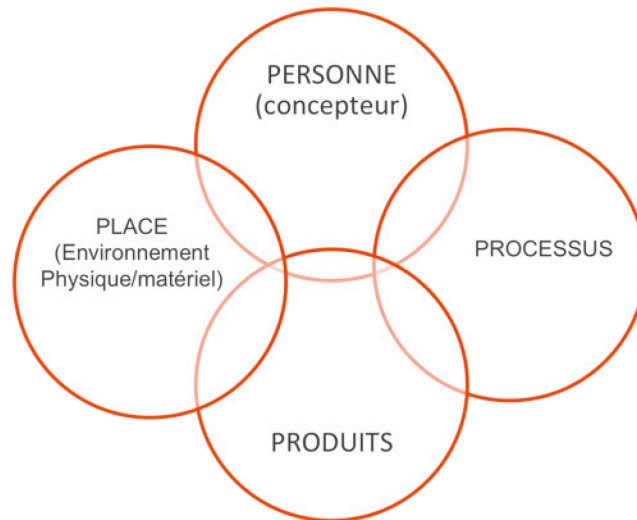


Figure 4 : Le modèle des 4P de Rhodes

Par ailleurs, la créativité a aussi été analysée en divisant le processus créatif en phases. Un des premiers modèles phasiques du processus créatif est celui de Wallas (1926). C'est un modèle qui décompose le processus en 4 phases, soit celle de la préparation, l'incubation, l'illumination et la vérification (cf. figure 5). Les phases de préparation et de vérification sont assez communes à d'autres modèles du processus de création. Quant à l'incubation, il s'agit du moment pendant lequel les idées sont générées de manière inconsciente et l'illumination correspond justement à la prise de conscience soudaine d'une idée intéressante.

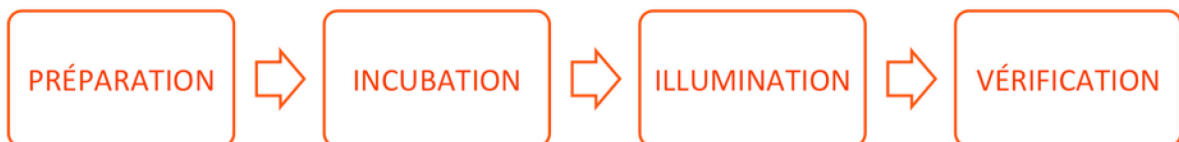


Figure 5 : Modèle de la pensée créative (Wallas, 1926)

Avec le regain pour les études sur la créativité, plusieurs modèles de type phasique ont été élaborés. Howard et al. (2008) en ont fait une recension (Tableau 1) et les ont classé selon quatre grandes phases analyse-génération-évaluation-communication, mais avec une sémantique différente, ou en rajoutant et/ou précisant certaines phases. Ces quatre phases seront discutées lors de la présentation des modèles phasiques décrivant le processus de conception architecturale à la section 1.2.2.

Tableau 1 : Modèles théoriques des processus cognitifs (Howard et al., 2008)

Models	Analysis phase				Generation phase			Evaluation phase	Communication / implementation phase		
Helmholtz (1826)	Saturation				Incubation	Illumination		X	X		
Dewey (1910)	A felt difficulty	Definition and location of difficulty			Develop some possible solutions			Implications of solutions through reasoning	Experience collaboration of conjectural solution		
Wallas (1926)	Preparation				Incubation	Illumination		Verification	X		
Kris (1952)	X				Inspiration			Elaboration	Communication		
Polya (1957)	Understanding the problem	Devising a plan			Carrying out the plan			Looking Back	X		
Guilford (1957)	X				Divergence			Convergence	X		
Buhl (1960)	Recognition	Definition	Preparation	Analysis	Synthesis			Evaluation	Presentation		
Osborn (1963)	Fact-finding				Idea-finding			Solution-finding	X		
Parnes (1967)	Problem, challenge, opportunity	Fact-finding	Problem-finding		Idea-finding			Solution-finding	Acceptance-finding	Action	
Jones (1970)	Divergent			Search for data	Transformation		Pattern finding	Flashes of insight	Convergent Judgement		X
Stein (1974)	X Fact-finding				Hypothesis formulation			Hypothesis testing	Communication of results		
Parnes (1981)	Mess finding			Problem-finding	Idea-finding			Solution-finding	Acceptance-finding		
Amabile (1983)	Problem or task presentation		Preparation		Response generation			Response validation	Outcome		
Barron and Harrington (1981)	X				Conception	Gestation	Parturition	X	Bring up the baby		
Isaksen et al. (1994)	Constructing opportunities	Exploring data	Framing problem		Generating ideas			Developing solutions	Building acceptance	Appraising tasks	Designing process
Couger et al. (1993)	Opportunity, delineation, problem definition		Compiling information		Generating ideas			Evaluating, prioritising ideas	Developing an implementation plan		
Shneiderman (2000)	Collect				Relate			Create			Donate (communicate)
Basadur et al. (2000)	Problem finding	Fact finding	Problem defn.		Idea finding			Evaluate and select	Plan	Acceptance	Action
Krysanov et al. (2001)	Functional requirements		Structural requirements		Functional solutions		Analogies, metaphors	Reinterpretation	X		

D'autres approches à la créativité, basées sur les théories citées ci-dessus (psychosociologique, psychométrique, cognitive), ont donné lieu à d'autres modèles. Trois de ces modèles, souvent cités dans la littérature, sont résumés :

- L'approche systémique de la créativité, défendue par Csikszentmihalyi et al. (1996, 1999). Ce modèle de la créativité résulte de l'association de trois systèmes décrivant l'individu comme étant en interaction avec un domaine et un champ :

- L'individu (« individual ») dont le rôle est d'apporter des transformations aux connaissances relevant du domaine, doit par ses connaissances agir sur le domaine pour proposer de nouvelles idées ou productions dites créatives.
- Le domaine (« domain ») qui correspond à un ensemble de connaissances associé à une culture donnée et qui comporte des productions sélectionnées par le champ;
- Le champ (« field ») qui regroupe les experts (gardiens du domaine) qui évaluent et décident du niveau de créativité des productions.

Pour Csikszentmihalyi, le créateur traite les informations fournies par le domaine et les transforme grâce à des processus cognitifs en fonction de ses traits de personnalité, de sa motivation et de ses connaissances. Si cette transformation est considérée comme ayant de la valeur par les experts du champ alors elle est ajoutée dans le domaine. Pour cet auteur, la créativité n'est pas attribuable à une seule composante mais à l'interaction des trois : individu, domaine et champ.

- Le modèle d'Amabile (1983, 1996)

Le modèle d'Amabile (1983, 1996) définit la créativité selon trois composantes : (1) les capacités dans un domaine (« domain-relevant skills », regroupent les connaissances techniques dans un domaine); (2) les processus liés à la créativité (« creativity-relevant processes », regroupant styles cognitifs, traits de personnalité, styles d'apprentissage); et (3) enfin la motivation (« task motivation ») pour effectuer une tâche intrinsèque (ex : plaisir à réaliser une tâche) ou extrinsèque (ex : pression externe, etc.).

Pour Amabile, la créativité ne peut s'exercer si l'une des trois composantes fait défaut. Par ailleurs, la motivation est un facteur déterminant car elle détermine « la différence entre ce que l'individu peut faire et ce qu'il fera ». Pour être créatif, un concepteur ne doit pas seulement avoir des dispositions naturelles, il doit aussi se former à l'expérience du travail créatif, tout en ayant un désir de développer des solutions créatives.

- L'approche multivariée de la créativité (Sternberg&Lubart, 1995; Lubart, 2003);

Cette approche multivariée de la créativité est la plus pertinente pour la présente thèse car elle englobe les différents facteurs impliqués dans la créativité qui ont été identifiés au

cours des recherches réalisées ces 50 dernières années. Ainsi, cette approche associe les facteurs individuels, sociaux/environnementaux et émotionnels.

Il y a eu d'abord le modèle de Sternberg et Lubart (1991, 1995) qui recensent six types de ressources nécessaires à la créativité : l'intelligence, les connaissances, la personnalité, les styles cognitifs, la motivation et le contexte environnemental. Ce modèle fut ensuite amélioré par Lubart (2003) en rajoutant l'importance des facteurs émotionnels lors du processus créatif (cf. figure 6).

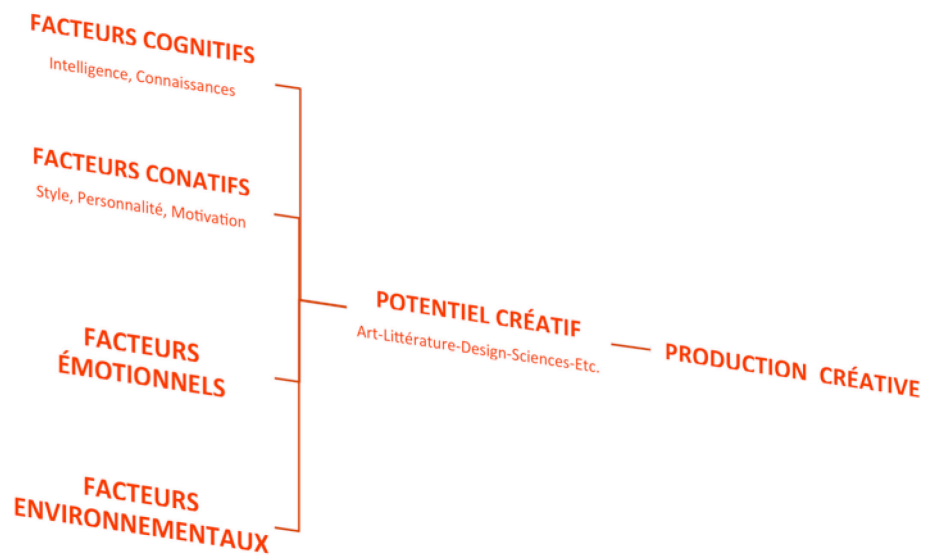


Figure 6: Modèle de l'approche multivariée de la créativité (Sternberg et Lubart, 1995; Lubart, 2003).

Ce modèle multivarié met en évidence le potentiel créatif (Sternberg et al., 2010) dont peut disposer un individu qui peut influencer sa performance créative. Les quatre groupes de facteurs proposés par Sternberg et Lubart (1995) ont aussi été étudiés par d'autres chercheurs. Ces derniers ont développé leurs propres modèles de ces facteurs et mis l'accent sur l'intelligence ou les styles cognitifs, etc. Le texte ci-dessous présente les 4 groupes de facteurs du modèle de Sternberg et Lubart, soit (1) les factueurs cognitifs, (2) les facteurs conatifs, (3) les facteurs environnementaux et enfin (4) les facteurs émotionnels.

Les facteurs cognitifs regroupent les concepts d'intelligence et de connaissances. L'intelligence, définie comme les capacités intellectuelles des individus, est divisée en trois sous-groupes comprenant l'intelligence synthétique (définir et représenter les problèmes de façon nouvelle), l'intelligence analytique (reconnaître les idées intéressantes) et l'intelligence pratique ou sociale (pour bien communiquer son travail aux autres »). Lubart (2003) font aussi mention de travaux mettant en liens créativité et quotient intellectuel (QI). Ainsi les personnes créatives ont généralement un QI supérieur à la moyenne (plus de 120) mais avec la nuance qu'en dessous d'un QI de 120, il y a une corrélation positive entre QI et créativité mais pas lorsque le QI est supérieur à 120.

Parlant d'intelligence, un autre chercheur dans le domaine de la créativité, Gardner (1993) propose sa théorie des intelligences multiples selon laquelle chaque individu dispose d'une forme d'intelligence unique. Selon Gardner, il existe 8 formes d'intelligence (a) verbale/linguistique, soit la capacité d'utiliser les mots efficacement pour s'exprimer, lire, décrire, expliquer interpréter et écrire; (b) musicale, soit une sensibilité pour la musique, le chant, etc.; (c) logique mathématique, soit la capacité de raisonner logiquement, de résoudre des problèmes, de comprendre des concepts abstraits, de calcul mental; (d) spatiale, soit la capacité de percevoir et d'opérer avec des représentations internes et externes, ce qui inclut l'imagerie mentale, esquisser, manipuler des données 3D; (e) kinesthésique soit utiliser son corps pour interagir et opérer sur/avec les objets; (f) intrapersonnelle, soit la capacité de se connaître, de gérer ses émotions et sentiments; (g) interpersonnelle, soit la capacité de saisir les émotions, les intérêts et les croyances des autres; et enfin (i) naturalistique, soit la capacité de comprendre la nature, les besoins des animaux et plantes. Gardner ne distingue pas vraiment créativité et intelligence.

Quant aux connaissances et aptitudes, second facteur du groupe cognitif de Sternberg et Lubart, elles réfèrent aux informations stockées en mémoire, elles sont nécessaires pour parvenir à réaliser une contribution dans le domaine considéré. Elles permettent de comprendre les situations et de ne pas réinventer ce qui existe déjà, en évitant cependant qu'elles ne nuisent à la recherche de créativité (comme par exemple en conservant toujours les mêmes anciens schèmes de pensée). Les capacités spatiales sont des exemples d'aptitudes importantes pour les architectes (Ho, 2006, Yukhina, 2008).

Les facteurs conatifs réfèrent « à des façons préférentielles et/ou habituelles de se comporter » (Lubart, 2003). Ces facteurs comprennent :

(a) les traits de personnalité qui présentent théoriquement et empiriquement des relations significatives avec la créativité : la persévérance, la tolérance à l'ambiguïté, la prise de risque, l'ouverture aux nouvelles expériences et l'individualisme. Dans le domaine de l'architecture, Mackinnon (1962) a, sur la base de tests psychométriques, comparé 40 architectes les plus talentueux des États-Unis de l'époque à des architectes considérés comme « peu talentueux » par leurs pairs. Les résultats ont révélé que les architectes renommés sont significativement plus indépendants, spontanés, individualistes et non-conformistes que la moyenne de la population.

(b) les styles cognitifs qui réfèrent aux préférences d'un individu pour raisonner, organiser et représenter l'information dans son esprit (Roberts, 2006). Le style cognitif est une notion psychologique qui n'est pas liée à l'intelligence, les traits de personnalité et le genre. C'est une composante importante des différences individuelles (Yukhina, 2008). Le style d'apprentissage et le style cognitif sont des concepts distincts, même s'ils sont souvent confondus. Ainsi, le style cognitif est inné et stable tandis que le style d'apprentissage résulte de l'inné et de l'acquis et peut donc évoluer avec l'expérience. Les styles cognitifs, souvent assimilés aux styles d'apprentissage dans la littérature, ont comme propriété essentielle d'être bipolaires. C'est-à-dire que, selon les circonstances et la tâche à réaliser, les individus appartenant à un pôle sont plus ou moins performants (Tyndiuk, 2005). Les individus sont caractérisés par leur position sur un continuum entre ces deux pôles. Cette caractéristique permet notamment de les distinguer de l'intelligence et des aptitudes/connaissances (telles que les capacités spatiales), considérées directionnelles et valorisées puisqu'il est préférable d'avoir un haut niveau d'aptitude. Un grand nombre de dimensions de styles cognitifs ont été proposées et ont permis de différencier les individus tels : globaux vs. analytiques, verbaux vs. imageurs, réflexifs vs. impulsifs. Une revue des styles cognitifs se retrouve dans Riding & Rayner (1998).

(c) la motivation qui peut être intrinsèque (ex : créer pour son propre plaisir) ou extrinsèque (ex : pressions externes, compétition). Contrairement à Amabile (1996),

Sternberg et Lubart (1995) pensent que ces deux types de motivation constituent des ressources pour la créativité, dans la mesure où elles incitent l'individu à travailler et lui permettent de conserver son attention sur la tâche.

Les facteurs environnementaux regroupent l'environnement social (famille, école, lieu de travail mais aussi société et culture d'une époque) et l'environnement physique (dont les media d'aide à la conception). Ces facteurs environnementaux influencent la créativité puisque les études sur les environnements familiaux, sociaux et professionnels de créateurs révèlent que les créateurs ont généralement besoin de structures encourageant la créativité.

Enfin, les facteurs émotionnels positifs ou négatifs ont une influence sur la créativité. Par émotions, Lubart (2003) désignent plusieurs concepts plus ou moins distinctifs qui regroupent les notions d'états émotionnels (une réaction courte et intense à un stimulus externe), d'humeur et les traits et styles émotionnels (tels que la clarté des émotions, l'intensité affective, l'expressivité émotionnelle, etc.). Plusieurs recherches, avec parfois des résultats contradictoires, ont été menées sur le lien entre créativité et émotions. Par exemple, Lubart (2003) citent les travaux de Isen (1999), pour qui seules les émotions positives favorisent les performances créatives alors que les travaux de Abele (1992) avaient donné lieu aux mêmes résultats mais tout en soutenant que les émotions négatives pouvaient favoriser en partie la créativité. Ainsi, les individus produisent plus d'idées positives dans des tâches leur permettant de réguler leur humeur, ou lorsqu'ils considèrent que la tâche est intéressante à réaliser.

Lubart (2003) résume ainsi l'influence de l'émotion sur la créativité. Dans le processus créatif, l'émotion peut être utilisée selon 3 perspectives : (a) l'émotion comme variable motivationnelle; (b) comme variable contextuelle; (c) comme variable fonctionnelle. Dans le premier cas, l'émotion est un facteur motivant la créativité, un moyen d'exprimer les expériences affectives et les caractéristiques émotionnelles individuelles. Dans le second cas, l'émotion est un facteur qui positionne les individus dans un état spécifique (physiologique, comportemental et cognitif) et permet de favoriser ou d'inhiber les performances créatives. Enfin dans le troisième cas, l'émotion est une variable

fonctionnelle qui peut dissimuler les concepts spécifiques qui, par leur activation, peuvent améliorer la créativité des individus.

Pour Sternberg et Lubart (1995), la créativité représente plus qu'une simple résultante du niveau d'un individu pour chaque composante de la créativité. Ainsi par exemple, en dessous d'un certain seuil de connaissance, la créativité est impossible; ou encore, il n'y a pas de créativité sans aucune prise de risque. Par ailleurs, il peut y avoir une compensation partielle, c'est-à-dire qu'une forte motivation peut combler des lacunes au niveau des connaissances, ou encore un haut degré de persévérance peut compenser en partie un environnement peu enclin aux idées nouvelles.

L'approche multivariée est particulièrement adaptée pour expliquer les différences interindividuelles. Chaque individu présente un profil particulier sur les différents facteurs mentionnés. Cela explique que dépendamment du domaine, un individu peut disposer à la fois d'un niveau faible ou élevé de créativité.

La plus grosse lacune de ce modèle multivarié de la créativité concerne son opérationnalisation expérimentale à cause de la multitude de variables impliquées. Seules quelques études de ce genre ont été entreprises (Amabile, 1996. Lubart et Sternberg, 1995). Dépendamment du domaine créatif, les chercheurs auront tendance à cibler un ou plusieurs facteurs pour analyser les différences interindividuelles entre leurs participants.

La créativité est intrinsèquement liée à tous les aspects de la conception architecturale : le concepteur, le contexte et les outils/media qu'il utilise pour générer des produits originaux. La volonté des architectes de créer des édifices qui soient à la fois originaux et adaptés/fonctionnels constitue une finalité de cette pratique. Dans la partie suivante, les similitudes entre les différents modèles de la créativité et ceux de la conception (architecturale) sont mises de l'avant.

1.2 La conception architecturale comme processus de résolution de problèmes

A partir des années 60, avec l'émergence des sciences cognitives (intelligence artificielle, psychologie, linguistique, etc.) et la volonté de faire de l'architecture une « science », est

apparue la volonté des chercheurs à comprendre ce qui se passe dans la tête des « designers » (l'activité cognitive) lorsqu'ils conçoivent, comment émergent les idées et concepts et comment ils les extériorisent. Plusieurs hypothèses émanant des recherches sur le processus de conception ont été confrontées. D'une part, il y a les partisans de « la théorie de la boîte noire » qui sont généralement les premiers théoriciens de la conception architecturale (Gordon, 1961; Osbourn, 1963; Broadbent 1966) pour qui la conception serait le fruit d'un travail opaque du cerveau dont on ne saurait décrire que ce qui y entre et ce qui en sort (Conan, 1990). D'autre part, on retrouve les partisans de « la théorie de la boîte de verre », où on considère que le concepteur « rationnel » qui à partir d'entrées (input), va produire la meilleure sortie (output) possible (cf. figure 7). Comme le rappelle Huot (2005, p.9), ces illustrations eurent un impact certain dans le domaine puisque considérer « le principe de la boîte noire revenait à abandonner toutes recherches sur le sujet alors que celui de la boîte de verre tendait à simplifier dramatiquement les processus de conception ».

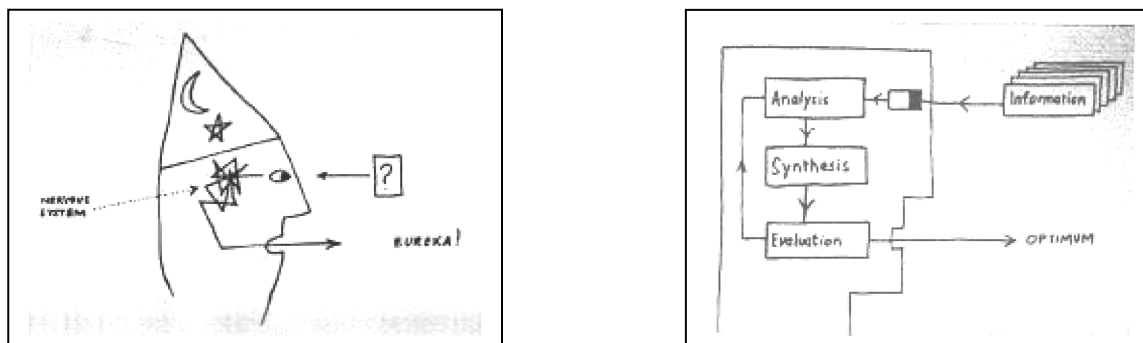


Figure 7. La boîte noire (à gauche) et la boîte de verre (à droite). (de John Christopher JONES; Source : Huot, 2005)

Néanmoins, la tendance actuelle de la recherche en architecture se rapproche du modèle structuraliste des non-romantiques qui permet d'étudier les processus cognitifs, les représentations et les connaissances nécessaires à la conception. En effet, cette dernière se définit comme un processus itératif de résolution de problèmes jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante; comme le soutient Simon (1974) dans son essai « La science de l'artificiel ». Ce modèle de résolution de problèmes (Newell et Simon, 1972, Simon, 1974,

2004) ne représente pas une finalité mais une prémisse dans le cadre de cette recherche. Dans cet esprit, le modèle structuraliste du STI agit comme une ligne directrice reliant les différents modèles théoriques et processus cognitifs influençant la conception architecturale qui est considérée par les cognitivistes comme une activité de résolution de problèmes complexes (Guilford, 1968; Newell et Simon, 1972, Matlin, 2001). Des modèles de la conception architecturale sont présentés à la section suivante.

1.2.1 Processus de résolution de problèmes

Le modèle de Newell et Simon (1972) constitue néanmoins une assise importante dans la littérature sur la conception (« cognitive design studies »). « Formellement, la conception est, bien sûr, une activité de « résolution de problèmes » (Visser, 2009), comme en témoigne le champ lexical développé par cette théorie est encore fortement utilisée : espace de problèmes, espace de solutions, but initial, but final/cible, stratégie de recherche, etc. Ce modèle de Newell et Simon (1972) a servi de référent à plusieurs modèles qui ont essayé de catégoriser les problèmes à résoudre. Aujourd'hui, ce n'est plus le concept de problème qui est discuté chez les spécialistes en conception mais plutôt ce à quoi il réfère dans une activité aussi complexe que la conception.

Le terme problème peut se comprendre globalement comme « toute tâche qu'un individu cherche à accomplir » (Lubart, 2003). En conception (design) et plus spécifiquement en architecture, ce sont toutes les procédures, processus cognitifs, connaissances, compétences qui rendent difficile une formalisation du processus. Les problèmes de conception ont déjà été qualifiés de mal définis car ils manquent de spécifications (Eastman, 2003, Bonnardel, 2006), de « wicked » car ils ne peuvent être déterminés de manière définitive puisqu'ils dépendent, entre autres, du contexte (Rittel et Webber, 1973). Ce sont des problèmes ouverts car il y a plusieurs solutions possibles (Minski, 1961 repris par Fustier, 1989) et ils sont mal structurés (Simon, 1974 et 2004). Ces différentes définitions des problèmes de conception, similaires aux définitions des problèmes créatifs non routiniers traités précédemment, mettent en exergue trois caractéristiques des activités de conception (Bonnardel, 2006) : «(a) Il n'y a pas une manière unique de résoudre un problème de conception donné ; (b) La description d'un problème de conception n'est pas exhaustive, à cause du trop grand nombre d'éléments qui caractérisent un problème ; (c) il n'existe pas

une solution optimale pour un problème donné”.

Par ailleurs, la résolution de problèmes de conception évolue de manière imprévue puisque le problème est redéfini en cours de processus. On parle d'organisation opportuniste ce qui renvoie à une adaptation par le concepteur de stratégies de conception en fonction des situations et contraintes (Visser, 2006; Lebahar 2007). Pour toutes ces raisons, Lebahar (2007) soutient qu'il est plus approprié de parler de tâche de conception plutôt que de problèmes mal définis⁵. La tâche de conception se présente comme « composée de plusieurs problèmes, multiformes et multidomains » plutôt que de problème unique » (Lebahar, 2007). Ainsi pour Bonnardel (2006), ces problèmes de conception dépendent non seulement des spécifications qui sont fournies à l'individu qui le résoud mais également des connaissances dont il dispose pour se construire une représentation mentale du projet. Visser (2009) soutient aussi que pour de nombreux composants d'une tâche de conception, les concepteurs sont souvent incapables de récupérer une réponse prédéfinie en mémoire : pour arriver à une solution, ils doivent construire de nouvelles procédures.

Malgré ces essais pour comprendre et saisir la diversité et la complexité des problèmes de conception, plusieurs auteurs critiquent ce modèle réductionniste (Schön, 1987; Kalay, 2004; Lawson, 2006; Lebahar, 2007; Visser, 2009) de la conception vu uniquement comme un processus de résolution de problèmes. Alors que dans les années 60, les chercheurs souhaitaient légitimer une démarche scientifique rigoureuse en formulant un modèle (boîte de verre); le second courant, à partir des années quatre-vingt, consistera à transposer les approches cognitives dans le champ de la conception pour qualifier et identifier les processus (Fernandez, 2002). Tout en considérant l'approche de résolution de problèmes, ces différents modèles qui ont essayé de modéliser la complexité du processus de conception, ont permis de mettre en avant plusieurs propriétés de la conception architecturale; entres autres, le caractère dynamique, le contexte et les contraintes des problèmes de conception.

⁵ Lebahar (2007) soutient que dans le domaine académique/didactique, le concept de problème est bien approprié dans la mesure où les différentes composantes de la tâche prescrite, sont abstraits et suffisamment bien définis.

1.2.2 Les modèles théoriques de la conception architecturale

L'aspect dynamique et itératif a été représenté par la métaphore de la spirale dont le modèle le plus connu est celui de Zeisel (1981), lui-même basé sur les modèles de Asimov (1962).

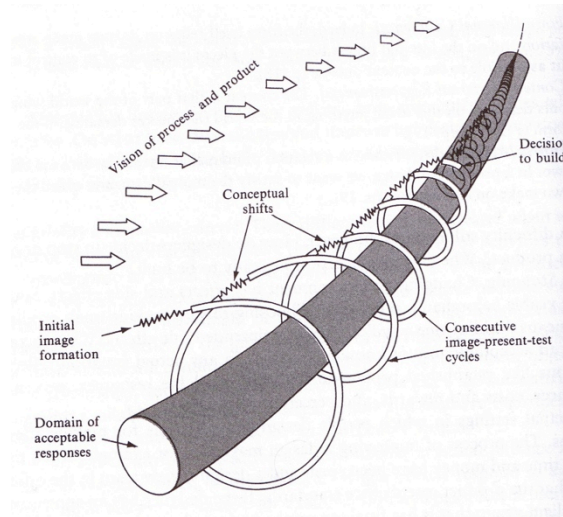


Figure 8 : Modèle de Zeisel (2006)

La métaphore de la spirale de Zeisel (fig. 8) illustre bien la dimension « dynamique » de la résolution des problèmes de conception. Selon son auteur, la spirale souligne trois caractéristiques de la conception : (1) les concepteurs semblent faire marche arrière à certains moments et s'éloigner de la solution; (2) les concepteurs répètent les mêmes séquences d'activités, résolvant ainsi de nouveaux problèmes à chaque répétition; (3) les mouvements apparemment multidirectionnels se fondent en un seul mouvement dirigé vers une seule action et but à atteindre.

L'autre aspect qui ressort des différents modèles de conception est l'importance du contexte et de ses contraintes pour la conception. Selon Akin (1986) la définition du problème de conception (« sa formulation ») résulte de mécanismes d'acquisition d'informations à partir de l'environnement externe ainsi que des mécanismes d'interprétation de ces informations et du stockage en mémoire de celles déjà interprétées. Cette description est compatible avec le caractère opportuniste de la conception ainsi qu'avec le courant de la « cognition située » qui met en exergue le rôle du contexte. Cette dernière approche proposée en psychologie

cognitive et en intelligence artificielle (Clancey, 1997), soutient que « que la pensée ne peut donc se comprendre qu'en relation directe avec l'action dans son contexte d'élaboration, c'est-à-dire : la situation » (Valléry, 2001, p.122). Les décisions sont prises dépendamment de la situation courante et de la façon dont cette situation est interprétée par l'individu. Bonnardel (2006) soutient que dans le cadre des activités de conception, les représentations mentales évoluent au fur et à mesure de la définition et de la propagation des contraintes dont certaines reflètent l'état de la situation courante. En architecture, il faut distinguer l'aspect fonctionnel et représentationnel du contexte. Par exemple, un bâtiment normalement conçu pour un site précis doit répondre aux normes et règlements propres à ce site (zonage, culture locale, typologie, etc.). La théorie de la 'cognition située' se base aussi, « sur une compréhension dynamique de la mémoire lui attribuant la possibilité de produire des structures comme des représentations mentales » (Iordanova, 2009), représentations qui sont construites en même temps que se déroule le processus de réflexion ou de création. Ce point de vue concorde avec celui de Schön (1987), un autre défenseur de la contextualité de la conception. Selon ce dernier, dans une situation ou un contexte donné, les interactions entre l'espace du problème et l'espace de la solution sont décrites comme résultant d'une « conversation réflexive » entre le concepteur et la représentation externe de l'objet en cours de conception. Chaque concepteur se construit sa propre représentation du problème et traite un problème qui lui est spécifique mais qui dépend aussi du contexte de la conception. Cette représentation dépend non seulement des spécificités du problème à résoudre mais également des compétences et du niveau d'expertise des concepteurs (Bonnardel, 2006; Lebahar, 2007).

Enfin, dans une situation de conception, la réussite d'une tâche de conception implique la satisfaction de « contraintes » (Lawson, 2005; Lebahar, 2007; Bonnardel, 1993, Visser, 2009). Pour ces auteurs, les contraintes exercent plusieurs fonctions, elles permettent : de circonscrire progressivement l'espace de recherche en fonction des connaissances du concepteur et du contexte ou de la situation courante ; de limiter l'espace de recherche (ex : contraintes techniques); de fixer les critères de sélection ou d'évaluation des hypothèses; d'étendre les conséquences d'un choix de conception basée sur un ensemble de contraintes portant sur une partie de l'artéfact à l'ensemble de l'artéfact (« propagation » des contraintes).

Au cours des trente dernières années, plusieurs chercheurs (Zeisel, 1983; Conan, 1990; Gero, 1996; Dorst et Cross, 2001; Shah et al, 2005; Jin et Chulsip, 2006; Cross, 2007) ont proposé et continuent de proposer des modèles par phases du processus de résolution de problèmes notamment pour la conception architecturale. La présente recherche n'a pas pour objectif d'en faire une analyse exhaustive mais plutôt de présenter un résumé des différentes phases de conception et d'insister sur le caractère dynamique et itératif de ces modèles, où la stratégie de l'essai et erreur joue un rôle important. Néanmoins, un recensement des phases du processus de conception est proposé à la section suivante,

1.2.3 L'idéation architecturale : une phase récurrente du processus de conception

Par définition, le processus de conception architectural est composé de plusieurs phases. Le but ici n'est pas de détailler ces différentes phases ou de proposer un autre modèle. Il s'agit plutôt de présenter un modèle simple qui reprend l'essentiel des modèles présentés par d'autres chercheurs qui emploient souvent une sémantique différente pour exprimer, à quelques nuances près, la même chose. Le modèle qui est utilisé, dont la terminologie est inspirée du modèle généraliste de l'Ordre des Architectes du Québec, décompose le processus de conception architecturale en quatre phases :

1. La phase de programmation/préparatoire dans laquelle les caractéristiques principales du projet sont énoncées et qui induit également l'étude des cas précédents et du fonctionnement du site. C'est une phase d'analyse qui permet au client de déterminer ses besoins/attentes et par conséquent à l'architecte d'élaborer, ou de contribuer à élaborer le « problème de conception » qu'il aura à résoudre.
2. La phase d'esquisse où le concepteur définit ses concepts et choisit son parti architectural en explorant les différentes facettes du problème énoncé précédemment et en testant et proposant plusieurs alternatives.
3. La phase préliminaire qui débute à partir du moment où le parti architectural se précise, notamment après des échanges avec le client et/ou d'autres intervenants.
4. La phase d'exécution où sont produits les documents qui doivent assurer la construction. Les dessins d'exécution doivent représenter le plus fidèlement possible l'objet à construire.

Le « géométral », c'est-à-dire les représentations techniques traditionnelles (dessin en plan, coupe et élévation), assure ici la transmission rigoureuse de l'information géométrique à construire.

Par ailleurs, la recension des différents modèles du processus de conception (Middleton, 1998; Matlin, 2001; Huot, 2005; Bonnardel, 2006; Lawson, 2005; Mougnot, 2008) montrent qu'à chacune de ces phases, les méthodes de résolution de problèmes ont statué sur l'importance de trois activités définies par Nigel Cross (cf. figure 9) : l'exploration du problème de conception, la génération des solutions et leur évaluation. Selon les auteurs, ces trois notions deviennent soit Analyse-Synthèse-Évaluation (Asimov, 1962, McNeil, Gero et Warren, 1998) ou encore Frame-Move-Evaluate (Schön, 1987). Ci-dessous, une description sommaire de ces trois activités :

- L'exploration : il s'agit d'une activité que l'on peut qualifier de recherche. Elle met en jeu les savoirs et l'expérience, mais aussi toutes les données externes que le concepteur va pouvoir récolter et assimiler. Ainsi, elle permet de cerner le problème, de le situer afin de pouvoir constituer un espace des solutions possibles, de délimiter le problème par des contraintes.
- La génération de solutions et leur représentation mentale (images mentales) ou externe via les outils d'aide à la conception: Le processus de conception se fonde aussi sur l'expérimentation et l'exploration de solutions multiples. Il s'inscrit dans une démarche itérative pour développer un résultat original et nouveau (Schön, 1987). Dès lors, un point important de la démarche créative est la génération de nombreuses solutions potentielles et la représentation de celles-ci afin de les évaluer et de les analyser.
- L'évaluation : ces solutions potentielles doivent alors être évaluées par rapport à l'ensemble de contraintes qui ont été posées au départ, ou introduites a posteriori : il s'agit alors de modifier, reformuler ou écarter des solutions. Ainsi, le processus est itératif, l'évaluation est permanente, modifiant et réduisant l'espace des solutions afin de relancer de nouvelles explorations et solutions.

Dans le cadre de cette recherche, ce cycle d'exploration-génération-évaluation sera défini comme correspondant à « l'idéation ». Ces interactions et itérations entre ces trois activités, même si leur intensité varie en fonction de l'avancement du projet (Ullman, 2003), sont

présents dans chacune des phases de la conception comme le soutiennent également Idi et al. (2011). Selon le Larousse, le concept d'idéation, issu de la psychologie, représente la formation, et l'enchaînement des idées, la production des idées. Dans le domaine de la créativité et de la conception, ce terme est utilisé par les auteurs dans son acception première, sans définition préalable (Shah et al., 2001; Lawson, 2005, Dorta, 2007) ; à notre connaissance, ce concept n'est pas encore théorisé. Néanmoins, notre définition de l'idéation architecturale semble être confortée, si l'on se fie à ces deux définitions de l'idéation trouvées dans la littérature: « *Design ideation can be seen as a matter of generating, developing and communicating ideas* » (Johnson, 2005, p.613) ou encore « *Ideation processes in architectural design represents designer ability to think and generate new functional ideas that will become solutions to the architectural design problem* » (Idi et al, 2011, p.250).

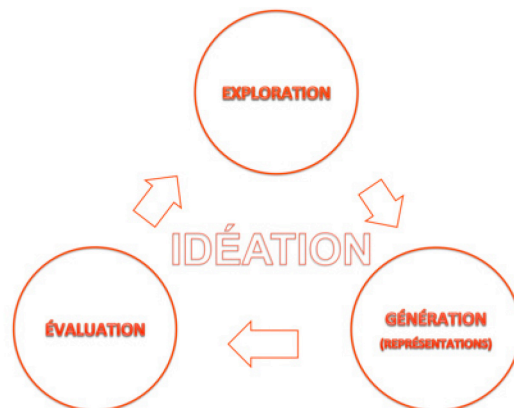


Figure 9: le cycle Exploration-Génération-Évaluation

Un des objectifs de cette thèse est d'analyser les processus cognitifs impliqués lors de l'idéation architecturale mais surtout lors des premières phases caractérisées par une relative liberté de conception et où la créativité des concepteurs semble la plus sollicitée. En effet, les premières phases de la conception sont particulièrement riches en itérations et en boucles d'exploration-génération-évaluation (idéation) comme le soulignent Pahl et Beitz, (1988) ainsi que Ullman (2003), (fig. 10). Selon ces auteurs, dans les phases en amont, la connaissance du problème de conception est à son minimum et la liberté de conception à son maximum. Il est intéressant de noter qu'au fil du temps d'un projet de

conception, à mesure que l'espace problème se transforme en espace solution (Lawson et Dorst, 2009), la liberté de conception évolue progressivement vers un état où elle devient limitée.

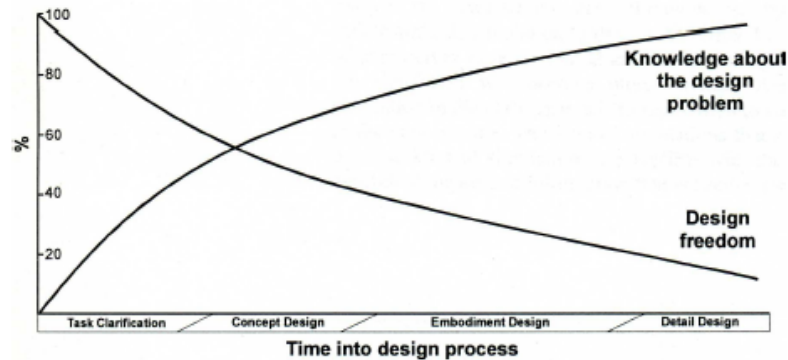


Figure 10: Description schématique de la liberté de conception en fonction de la connaissance du problème de conception (Ullman, 2003).

1.3 Synthèse

Pour résumer ce chapitre, selon l'approche cognitive de la créativité et des activités de conception, l'architecture repose sur un processus dynamique et itératif de recherche d'une solution « satisfaisante », à la fois originale et fonctionnelle, à partir d'un problème de conception non routinier et ouvert. Ce cycle itératif d'exploration-génération-évaluation, ici défini comme correspondant à l'idéation, nécessite des représentations. Ces représentations qui peuvent être internes (processus cognitifs) ou externes (esquisses, maquettes, modèle 3D, textes) sont essentielles à tout acte créatif et à toutes les phases du processus de design puisqu'elles constituent un moyen de projection de la pensée de l'architecte et de son savoir-faire.

Chapitre 2

Idéation architecturale et représentation

Il est aujourd'hui admis que les activités de conception sont caractérisées en psychologie cognitive comme des activités de construction de représentations : "*a global definition of design from a cognitive viewpoint is to **elaborate representations** (mental and external) of the to-be-specified artefact until they are so precise and detailed that they completely specify the artefact's implementation*" (Visser, 2006, p.114). Il existe plusieurs définitions du concept de représentation. Étymologiquement, le terme vient du latin *repraesentare* qui signifie rendre présent une chose absente de notre champ perceptif. Dans le domaine de la psychologie cognitive, Gallina (2006) propose une définition consensuelle de la représentation : "la notion de représentation désigne à la fois le processus de mise en correspondance de deux éléments (le représentant et le représenté), ainsi que le résultat de ce processus, donc le représentant, quelle que soit sa nature". Ainsi, une représentation peut être physique (photographie, maquette, esquisse, etc.) ou mentale (image, concept, etc.).

Que ce soit dans un cadre académique ou professionnel, les architectes abordent généralement un nouveau projet en prenant connaissance du programme ou cahier des charges, en visitant le site et en rencontrant les clients pour échanger sur le projet. Le projet au départ est abstrait et mental (Halin, 2004), une représentation (image) mentale, car l'idéation ne survient pas seulement lorsque les architectes réalisent des esquisses mais est rattachée à une activité de conception interne par le biais de l'imagerie mentale (Goel, 1995; Bilda, 2006). Puis au fur et à mesure de l'évolution du raisonnement, de la création, des choix, des alternatives, le projet va prendre forme grâce à des représentations externes soit par un dessin (esquisse), par une description schématique ou encore textuelle. Le projet représenté devient le support de confrontation avec les futurs utilisateurs, de réflexions par le concepteur, de discussions avec les co-concepteurs jusqu'à l'obtention d'une solution « satisfaisante ». Plusieurs auteurs ont proposé des taxonomies de ces représentations. Rasmussen (1986) a développé le modèle hiérarchique d'abstraction selon lequel les représentations évoluent d'un niveau abstrait, où l'artéfact est virtuel, peu défini, à des

niveaux de représentations plus concrètes, lorsque l'artéfact est mieux défini au niveau fonctionnel et structural. Dans le domaine de la conception, Lebahar (2007) propose aussi un modèle des différents types de représentations externes qu'il nomme « registres », soient des registres topologiques qui se basent sur le caractère flou et abstrait pour simuler le dialogue avec les représentations mentales; le registre projectif qui permet la projection approximative des objets développés dans le registre topologique et enfin le registre euclidien qui fixe les objets (distances, angles), la représentation devenant « indéformable ».

Ainsi, les concepteurs, au moyen de différents media, produisent différentes représentations externes pour satisfaire différents objectifs durant tout le processus de conception (Purcell et Gero, 1998). Le but principal du concepteur en produisant ses représentations est de les développer afin de générer un artéfact satisfaisant. Ce type de représentation est prévu pour communiquer et partager les idées. À cet égard, concevoir est un exemple typique de l'usage simultané des représentations internes et externes.

2.1 Les représentations internes

Les stratégies et mécanismes cognitifs de conception utilisés par les architectes tels que la (ré)interprétation, l'association, la restructuration, la combinaison, la formulation d'hypothèses, la justification, le raisonnement analogique (Visser, 2009; Karam, 2010) font appel aux images mentales mises en œuvre lors de l'idéation. Dans notre définition de l'idéation, l'exploration du problème et la génération des idées nécessitent forcément des images mentales, entre autres, en fonction des connaissances et de l'expertise du concepteur. La littérature (Akin, 1986; Goel, 1995; Bilda, 2006) fait ressortir d'emblée l'importance du lien entre l'imagerie mentale et la charge cognitive. Il s'agit de deux notions essentielles au processus de conception puisque l'on peut considérer que si la charge cognitive d'un concepteur est élevée lors de l'idéation, cela signifie qu'il utilise davantage son imagerie mentale (Bilda, 2006).

2.1.1 L'imagerie mentale

Une définition pertinente de l'imagerie mentale est celle donnée par Michel Denis (1989, p.12): « L'imagerie mentale désigne l'ensemble des mécanismes par lesquels l'individu

construit des représentations internes qui préservent les aspects figuraux des objets, les inscrits en mémoire, puis leur redonne une actualité cognitive dans des circonstances ultérieures ». Tous les domaines sensoriels sont concernés par l'imagerie mentale mais la majorité des travaux ont porté jusqu'à présent sur l'imagerie mentale visuelle.

L'analyse des processus mis en œuvre pour la résolution d'un problème ne paraît plus pouvoir aujourd'hui se passer « d'une prise en compte, de la représentation que l'individu se fait des données du problème, mais aussi de l'objectif à atteindre, des moyens requis pour l'atteinte de cet objectif, et des contraintes qui pèsent éventuellement sur la mise en œuvre de ces moyens » (Denis, 1989). Les travaux de Carroll et al. (1980) ont notamment montré que, dans la résolution de deux versions isomorphes d'un même problème, une version spatiale et une version temporelle, la version spatiale, qui suscite davantage l'imagerie visuelle, entraîne de meilleures performances et un temps de résolution plus court que la version temporelle. Cette image, concernant l'architecte en train de concevoir, est corroborée par les observations indépendantes (Gero, 1996; Schön, 1987; Suwa et Tverski, 1997), qui établissent la forte propension des architectes à recourir à l'imagerie mentale⁶.

2.1.1.1 Les caractéristiques des images mentales

Le fait que les images mentales possèdent une structure et une organisation interne, et surtout qu'il soit possible d'en rendre compte par le biais expérimental, ne s'est imposée que dans la seconde partie du 20^{ème} siècle. En ce qui concerne la nature de la représentation des images mentales, deux positions théoriques s'opposent. L'une, analogue, la plus étudiée et par conséquent la plus validée, qui stipule qu'il existe une fonction cognitive distincte permettant des représentations analogues aux réalités physiques (Kosslyn, 1980 et 1994). L'autre, propositionnaliste, où les représentations sont conçues comme des descriptions verbales, symboliques de la réalité (Pylyshyn, 2003). L'approche analogue, basée sur le modèle STI, est celle qui est retenue pour la présente thèse; comme elle l'est dans la quasi-totalité des articles/ouvrages consultés touchant le domaine de la conception cognitive. La théorie de Kosslyn (1980, 1994) définit l'imagerie mentale

⁶ Par ailleurs, pour rester cohérent avec le modèle STI présenté dans ce texte, nous considérerons, comme la majorité des chercheurs, que la MT est le siège des processus d'imagerie mentale.

visuelle comme la capacité à produire une image interne d'un objet ou d'une scène, de la manipuler et la transformer mentalement. Selon cette théorie, les images mentales se forment dans la mémoire de travail et sont associées au calepin visuo-spatial selon le modèle de la mémoire de travail de Baddeley 1986. Les travaux de Logie (1995) ont permis d'identifier et d'ajouter « un cache visuel » (visual cache) au précédent modèle. Ce cache fonctionne comme un lieu de stockage des images précédemment produites. « C'est un mécanisme important qui joue un rôle de maintien de l'information imagée pour un période prolongée sans répétition » (Tyndyuk, 2005). Il devient ainsi possible de traiter différentes images simultanément.

Cette approche analogique de l'imagerie mentale a permis plusieurs avancées et a confirmé que les images mentales et la perception possèdent des similitudes fonctionnelles et structurales. Fortin et Rousseau (1993) ainsi que Matlin (2001) recensent un certain nombre d'études qui cautionnent cette ressemblance entre image et percept. Au niveau des similitudes fonctionnelles, Gallina (2006) cite l'expérience de Engelkamp et Krumnacker (1980) dont les résultats montrent que « la mémorisation d'énoncés décrivant des actions (« jouer au piano » ou « lancer une balle ») est favorisée aussi bien par l'imagerie mentale que la perception directe de ces actions ». Des travaux de Paivio (1986) sur la théorie du double codage, font ressortir deux systèmes de représentation mitoyens : l'un, imagé, qui renvoie aux situations mettant en œuvre la perception (surtout visuelle) d'objet ou d'événements matériel non verbaux; l'autre, verbal, mettant en jeu une activité implicite du système verbal auditivo-moteur. « Ces deux systèmes évoluent, au cours du développement, vers des formes de plus en plus abstraites » (Lameyre, 1993, p.110). Les expériences de Paivio ont démontré que la rétention du matériel visuel est meilleure que celle des mots. « Car si les mots concrets (par ex : orange) sont plus facilement mémorisés que les mots abstraits (par ex : vérité) c'est parce qu'ils sont plus facilement imaginables » (Fortin et Rousseau, 1993, p.297). Des résultats expérimentaux démontrent aussi les similitudes structurales entre image et perception, c'est-à-dire que les représentations résultant d'une activité d'imagerie mentale ont les mêmes caractéristiques que les représentations issues de la perception. Ainsi, les mécanismes cognitifs (rotation mentale, exploration, transformation, etc.) relatifs à l'imagerie mentale et à la perception présentent

des analogies (Kosslyn, 1990, Kavakli & Gero, 2001, Gallina, 2006). Les travaux de Kosslyn démontrent, entre autres, que l'exploration mentale d'une image visuelle (l'expérience de l'île imaginaire) dure aussi longtemps que l'exploration de l'image physique. Les travaux de Shepard et Metzler (1971) indiquent les mêmes analogies concernant la rotation mentale. Leurs résultats ont montré que le temps nécessaire pour effectuer une rotation mentale d'un objet 3D est d'autant plus long que l'angle parcouru est plus important, comme c'est le cas avec l'objet physique. De même, en neuro-imagerie, Ganis et al. (2004) ont montré que les aires cérébrales activées étaient identiques que les sujets perçoivent l'objet ou l'imaginent mentalement. Ces résultats suggèrent que l'image mentale possède une structure qui reflète de manière analogique la structure des objets évoqués. Pour Denis (1989), l'imagerie mentale fournit des représentations qui permettent de raisonner ou de retrouver de l'information en l'absence des objets qu'elle évoque et donc de traiter cognitivement ces objets placés à distance ou pas encore fabriqués.

2.1.1.2 L'imagerie mentale et la conception architecturale

Les représentations mentales, qui sont formées grâce à l'imagerie visuo-spatiale, sont un apport important pour concevoir ou résoudre divers types de problèmes. Lors de l'idéation, les concepteurs emploient leur imagerie mentale de trois manières différentes selon Eastman (2001) :

- (a) Pour rappeler au concepteur les solutions qui ont été extériorisées dans les esquisses, Goldschmidt (1991) propose le terme « d'imagerie interactive ».
- (b) Pour utiliser les représentations externes seulement lors de prise des décisions importantes, ce qui permet d'enregistrer les idées importantes.
- (c) Pour visualiser les aspects 3D et pour imiter les transformations du design en l'absence des stimuli visuels.

Cette utilisation de l'imagerie se rapporte à une condition où l'architecte pourrait concevoir dans son esprit, en appliquant les transformations nécessaires. Une fois que l'objet "final" est formé mentalement, le concepteur extériorise l'image mentale. Le cas de Frank Lloyd

Wright est souvent cité pour sa capacité à concevoir et développer ses idées, en utilisant uniquement l'imagerie mentale. Il ne produisait une représentation externe qu'à la fin du processus de conception (Toker, 2003).

La majorité des concepteurs préfèrent ne pas utiliser leur seule imagerie mentale durant la conception. La raison principale en est que l'extériorisation faciliterait la créativité. Les études en sciences cognitives ont prouvé qu'on peut maintenir une quantité limitée d'informations dans la mémoire de travail et l'imagerie mentale utilise intensivement les ressources de la mémoire de travail. Par conséquent, l'hypothèse retenue notamment par Bilda et Gero (2007) dans le domaine de la conception est que l'extériorisation de l'information visuo-spatiale libérerait la mémoire de travail. Ainsi d'autres tâches peuvent être effectuées. De plus, les images mentales sont éphémères (Kosslyn 1980, 1994) ; or le concepteur a besoin d'un support physique pour voir, interpréter et raisonner à partir de ses images. Peu d'études se sont intéressées au potentiel de l'imagerie mentale comme paramètre de la conception.

Néanmoins, Athavankar (1997) a entrepris une expérience dans laquelle des designers industriels experts devaient concevoir uniquement sur la base de leur imagerie mentale, les yeux bandés, de sorte qu'ils n'aient aucun accès à l'esquisse et à la rétroaction visuelle qu'elle permet. Le contenu de la verbalisation du sujet a indiqué que le sujet pouvait faire évoluer la forme de l'objet, la manœuvrer, évaluer des alternatives et ajouter des détails. L'étude conclut que l'utilisation de l'imagerie dans la conception, peut potentiellement être un « medium » de remplacement pour l'esquisse. Les sujets ayant participé à cette expérience étaient des experts, ces résultats coïncident avec ceux obtenus dans d'autres domaines de recherche.

Ainsi, Ericsson et Delaney (1998) ont expliqué que les experts disposent d'une mémoire de travail à long terme qui complète la mémoire de travail à court terme. Un autre exemple de l'utilisation de la mémoire de travail à long terme est celles des joueurs d'échecs experts qui peuvent jouer simultanément, les yeux bandés, 10 parties d'échecs ou plus (Saariluoma 1998). Ces études sur les joueurs d'échecs experts ont permis de définir le concept « d'imagerie mentale habile » (« Skilled imagery », Saariluoma 1998, Ericsson et Delaney

1998), cela démontre l'efficacité de l'imagerie mentale pendant de longues périodes et ce, même si elle est associée à une charge cognitive élevée. La théorie de l'imagerie mentale habile fournit une explication sur la façon dont les experts peuvent maintenir et traiter de grandes quantités d'informations visuo-spatiales. Concernant les activités cognitives des joueurs d'échecs experts, la théorie de l'imagerie mentale habile déclare que les experts développent des dispositifs spécifiques d'encodage et de récupération qui leur permettent de stocker la nouvelle information et de la rechercher rapidement. En d'autres termes, les experts codent et stockent des sommes considérables d'informations visuo-spatiales, et ils peuvent facilement et rapidement rechercher ces structures préexistantes dans la mémoire à long terme (Saariluoma, 1998).

Une autre expérience a été menée par Bilda et Gero (2006, 2007) avec trois architectes experts dans des conditions similaires à celles décrites précédemment, soit les participants avaient les yeux bandés et en situation d'esquisses. Il est apparu que les sujets ont moins bien performés avec les yeux bandés. L'activité cognitive de tous les participants ayant les yeux bandés a chuté, par rapport à ceux qui ont réaliser des esquisses, 20 minutes après le début de la session de conception.

Ces résultats sont à mettre en relation avec la charge cognitive, qui influence forcément la quantité d'informations que peut retenir et extérioriser un architecte. La recherche actuelle ne permet pas de distinguer clairement l'intensité du lien entre charge cognitive et imagerie mentale lors de l'idéation, mais ces deux concepts sont fortement imbriqués (Bilda, 2006, Bilda et Gero, 2007). L'extériorisation des images mentales diminuerait la charge cognitive de la MT.

2.1.2. La charge cognitive

Comme le rappellent Bonnardel et Piolat (2003), le caractère complexe de la conception (problèmes mal définis, représentations mentales imprécises et en constante évolution, gestion des contraintes, etc.) fait que l'activité des concepteurs dépend énormément des ressources de la mémoire de travail (MT). Or comme le mentionne plusieurs auteurs dans le domaine de la conception (Wickens, 2000, Bilda et Gero, 2008), les ressources de la charge cognitive sont largement dédiées à l'imagerie mentale lors de l'idéation. La recherche

actuelle en cognition soutient que les représentations mentales ont besoin d'être extériorisées pour libérer la MT et plus précisément le calepin visuo-spatial. Selon la théorie de Baddeley, c'est dans ce calepin que sont produites les images mentales et que sont traités les stimuli visuels et spatiaux. Maintenir, transformer et inspecter les images/formes peut surcharger mentalement la MT (Baddeley, 2007; Logie, 2003). Les conclusions des études qualitatives dans le domaine des études cognitives en conception, surtout basées sur les études des esquisses « à main levée » durant la phase conceptuelle (Do et al., 2000; Goel, 1995; Goldschmidt, 1991), mettent ainsi en évidence l'importance de la charge cognitive.

Pour étayer l'importance de la charge cognitive dans le processus d'idéation, une définition de cette notion est proposée ainsi que son rôle en conception architecturale.

2.1.2.1 Définition de la charge cognitive

La charge cognitive, aussi appelée indistinctement « charge mentale » par les auteurs (Cegarra et Chevalier, 2008), est l'objet de nombreuses recherches en psychologie et ergonomie cognitives depuis les quarante dernières années (Chanquoy, 2007). Malgré cela, les chercheurs des différents domaines utilisent de manière imprécise plusieurs notions (ressources cognitives, effort mental, capacité cognitive) pour désigner des phénomènes similaires (Olive, 1997). Comme le rappellent Chanquoy et al. (2007), il est important cependant de distinguer la notion de charge cognitive/mentale de celle de ressources cognitives, cette dernière notion désignant l'énergie mentale disponible pour un individu en particulier, à un instant donné et pour un traitement particulier. Une autre distinction est aussi à faire entre les notions de charge mentale et celle de capacité cognitive, cette dernière correspondant à la quantité maximale de ressources que peut mobiliser un individu pour réaliser une tâche. La charge cognitive, à l'opposé des deux notions précédentes de ressources et capacité cognitives, ne serait pas une propriété inhérente à l'individu mais plutôt induite par la tâche que celui-ci doit réaliser.

Il existe plusieurs définitions de la charge cognitive, selon les domaines de recherche. Ainsi, en ergonomie cognitive, pour Wickens et Holland (2000, p.459) : « the concept of workload is fundamentally defined by this relationship between resource supply and task

demand ». En psychologie de l'éducation, pour Sweller qui a développé la théorie de la charge cognitive dans les années 80, la mémoire de travail accumule les informations en cours de traitement, ce qui constitue sa charge cognitive. Induire le moins de charge cognitive possible permet de laisser plus de place au traitement de l'information, et donc aide à améliorer le potentiel d'apprentissage. Dans cette même logique, pour Eggemeier (1988), toute augmentation de la difficulté de la tâche conduit à une détérioration des performances.

Dans la présente recherche, la définition consensuelle et générale de Chanquoy et al. (2007) de la charge cognitive est retenue. Selon ces auteurs, la charge cognitive «correspond à une quantité, une mesure de l'intensité du traitement cognitif engagé par un individu particulier, possédant certaines connaissances et certaines ressources, pour réaliser une certaine tâche, d'une certaine manière, dans un certain environnement». Cette définition rejoint ainsi celle de Hart & Staveland (1988, p.140), "Workload is not an inherent property, but rather it emerges from the interaction between the requirements of a task, the circumstances under which it is performed, and the skills, behaviours, and perceptions of the operator."

2.1.2.2 Charge cognitive et conception architecturale

Dans le domaine de la conception architecturale, peu de recherches se sont intéressées à la charge cognitive comme facteur influençant le design architectural. Lorsque cela a été fait, ce sont surtout des méthodes qualitatives/subjectives qui ont été utilisées. Nous pouvons citer les travaux de Bilda et Bilda & Gero (Bilda, 2006; Bilda & Gero, 2007; Bilda, Gero, & Purcell, 2006) qui voulaient valider que lors de la conception, les représentations externes réduisent la charge de la mémoire de travail. Par le biais de la verbalisation et de l'analyse des activités cognitives des designers, leurs résultats montrent qu'après un certain laps de temps, l'utilisation de l'imagerie mentale uniquement (en bandant les yeux des concepteurs) rendaient les concepteurs « non voyants » moins performants que les autres qui extériorisaient leur idées en esquissant. D'autres recherches en design ont utilisé les mesures qualitatives de la charge cognitive telles que les travaux de Dorta et al. (Dorta, 2007; Dorta et al., 2008) où le NASA TLX a été utilisé. A notre connaissance, aucune

étude n'a quantitativement étudié l'incidence de la charge cognitive sur le processus de conception et l'idéation architecturale. Ces différents travaux ainsi que la théorie suggèrent que l'extériorisation de l'information visuo-spatiale (imagerie mentale) est nécessaire afin de libérer la mémoire de travail pour que les autres tâches puissent être menées efficacement. De même, les représentations externes, et par extension les media d'aide à la conception, joueraient un rôle similaire dans le domaine de la conception architecturale.

2.2 Les représentations externes: les media d'aide à la conception

D'un point de vue cognitif, les opérations mentales qui agissent et transforment les images mentales partagent des similitudes structurelles et fonctionnelles. Mais, comme le rappellent Verstijnen et al. (1998) et Bertel et al. (2006, p.349), les images mentales et leurs représentations physiques sont complémentaires : *« mental and external representations complement one another as representational and procedural limitations of one form are often compensated for by the other. For example, external representations are durable and stable, internal representations are volatile and flexible »*.

La présente section est consacrée à la compréhension du rôle des différents types de représentations visuelles externes, produites par un medium d'aide à la conception, lors de la phase d'idéation architecturale. Le terme media⁷ (medium au singulier) est ici employé selon son étymologie latine, c'est-à-dire comme un moyen ou une interface entre les concepteurs et l'extériorisation de leurs idées. Pour Ataman et Bermudez (1999, p.1), *« In architecture, media can be defined as a tool, and an environment for selecting, gathering, organizing, storing, conveying and engaging knowledge in representational forms. Media enable ideas to be externalized and evaluated and hence become a highly influential factor in the design process »*.

Ces media qui servent de support à la réflexion du designer le poussent ainsi à faire évoluer ses premières idées : c'est ce que Schön (1987) dans son célèbre ouvrage « the reflective

⁷ Par déformation et évolution linguistique, média (au lieu de medium) et media (au lieu de media) sont acceptés. Mais par purisme et pour éviter une confusion avec média de communication, medium/media d'aide à la conception seront les termes utilisés dans cette thèse.

practitioner : how professional think in action » désigne par l'expression « reflective conversation ». Pour Schön, à chaque phase du processus de conception (qu'il nomme situation), le concepteur crée et modifie des représentations externes, qu'il va ensuite interpréter et analyser ; et c'est dans cette logique de représentation et d'interprétation que se développe la compréhension de la « situation » et par conséquent l'évolution du projet.

Selon Lebahar (2007), Goel (1995), Do et al. (2000), Suwa et Tverski (1997), les interactions avec les représentations extériorisées permettent à l'architecte de:

- Contrôler ses images mentales en faisant des choix de contraintes à respecter,
- Générer des concepts et les stocker
- Représenter l'information dans diverses formes (différents niveaux d'abstraction)
- Faciliter la perception et l'interprétation d'idées
- Manipuler et raisonner avec des dessins d'artefacts
- Reprendre et affiner des concepts
- Réduire l'incertitude quant au produit final à obtenir et ce en gérant des contraintes prescrites (budget, superficies, etc.)
- Sélectionner parmi ses connaissances (techniques, bioclimatiques, esthétique, fonctionnelles, etc.) celles qui sont adaptées à la tâche de conception
- Reformuler sa première représentation du problème.

Ces différentes interaction avec ses représentations permettent à l'architecte un « dédoublement cognitif », l'architecte devient juge et partie de ses propres hypothèses de design. Pour Lebahar (2007), « le dédoublement cognitif suppose l'existence d'une représentation mentale différente de la représentation matérialisée par le dessin. Ce dédoublement signifie que l'architecte dispose d'une connaissance disponible, dans sa mémoire, du bâtiment à concevoir : soit il utilise cette connaissance déclenchée par la situation de conception et des contraintes, soit il ne l'utilise pas ». Oxman (2001) parle d'un cycle de « re-représentation » lors de l'idéation, les images mentales et leurs représentations externes sont constamment réinterprétées. Ainsi, chaque concepteur se construit une représentation mentale compatible avec ses attentes et ses connaissances et les extériorise selon ses compétences par l'utilisation de media d'aide à la conception. Le medium d'aide utilisé a aussi une incidence sur la représentation et la transformation des idées

(Goldschmidt, 2001; Tang & Gero, 2011). Les concepteurs, au moyen de différents media, produisent différentes représentations externes pour satisfaire différents objectifs tout au long du processus de conception (Purcell & Gero, 1998).

Peu de recherches empiriques ont porté sur la relation entre l'idéation et les outils numériques. La raison est presque idéologique car les esquisses ont la plupart du temps été considérées comme le medium par excellence pour l'exploration des idées, alors que les media numériques sont supposés ne pas être à même de soutenir la créativité, surtout lors de la phase conceptuelle. Decortis et al. (2005) soulignent qu'en dépit de l'abondance d'outils numérique d'aide à la conception sur le marché (logiciels 3D de Conception Architecturale Assistée par Ordinateur, CAAO), les architectes entament généralement leurs projets avec le crayon et le papier, et transfèrent seulement leur travail sur un ordinateur à la fin du processus, qui devient un outil de présentation. Selon ces auteurs, ce choix peut être attribué au fait que les outils numériques exigent un niveau élevé de précision et ne laissent aucune ambiguïté, or ces facteurs de liberté et d'abstraction seraient nécessaires aux premières phases du processus de conception (Akin, 1986; Goel, 1995, Lebahar, 2007).

La section suivante aborde deux types de media qui sont utilisés dans les domaines académique et professionnel : les media tangibles, où l'on peut physiquement et matériellement manipuler les données (maquettes, les esquisses à main levée, annotations, diagrammes, etc.) qui se distinguent ainsi des media numériques (logiciels 3D de CAAO, équipement de réalité virtuelle, logiciel de programmation 3D, tablettes numériques, etc.). Comme pour la majorité des travaux consultés, cette thèse porte sur l'utilisation de trois media traditionnellement utilisés dans la pratique architecturale : soit l'esquisses, la maquettes et le logiciel 3D.

2.2.1. Les media tangibles

Depuis les années 80, les travaux sur les représentations externes se sont surtout concentrés sur les esquisses à main levée (« sketch ») durant la phase conceptuelle en architecture ou

d'autres activités de conception créatives (Goel, 1995, Goldschmidt, 1995, Do et al., 2000, Purcell et Gero, 1998).

2.2.2.1 Les esquisses à main levée

Encore aujourd'hui, l'esquisse et l'idéation sont deux activités inséparables pour la plupart des architectes (Akin, 1986 ; Lawson, 2005 ; Schön, 1987; Romer et al, 2001; 2005; Do, 2005; Menezes & Lawson, 2006; Purcell & Gero, 2006) puisqu'elles sont perçues comme un tandem nécessaire pour faire progresser leurs conceptions. Un des points de vue les plus répandus est que l'esquisse permet un dialogue unique et essentiel entre le concepteur et ce qui est suggéré par les esquisses (Schön, 1987; Goldschmidt, 1991). Les esquisses ont toujours été considérées comme le medium d'aide à la conception par excellence pour extérioriser les images mentales : "designing involves the interplay of sketching and imagery" (Goldschmidt, 1991).

Les études sur l'esquisse soutiennent que les représentations externes constituent une partie intégrante de la conception comme le rappellent Do et al., (2000), car elles permettent : (a) l'accès à une mémoire prolongée pour les images mentales visuelles, (b) la manipulation rapide des idées parce qu'elles peuvent être produites rapidement, (c) une représentation de l'information sous diverses formes (des vues différentes et des niveaux d'abstraction); (d) de stocker les solutions de conception, (e) de raffiner les idées, (f) de produire des concepts et faciliter la résolution du problème.

La recherche dans le domaine de la conception a toujours amalgamé l'utilisation des images mentales et l'activité d' « esquisser », qui ne sont pas perçues comme des processus cognitifs séparés (Suwa et Tverski, 1997). Ainsi, d'un point de vue cognitif, les esquisses ne servent pas simplement à enregistrer la pensée, mais ils permettent de créer de nouveaux concepts abstraits. De plus, le pouvoir des esquisses à favoriser l'évocation de nouvelles idées n'invalide pas l'utilité de dessins moins précis : l'esquisse peut paraître imprécise, mais le concept correspondant dans la tête du concepteur ne l'est pas davantage (Goel, 1995). Ce dernier auteur soutient que l'imprécision et l'ambiguïté mêmes des croquis joue un rôle important dans les premières phases du design. Puisqu'ils permettent au concepteur une réinterprétation de ses croquis. Suwa et al. (2001) confirment ainsi que

l'instabilité/ambiguïté des représentations externes peut être salutaire en conception. Schön soulignait déjà en 1983 que les esquisses à main levée servent de médium à la génération dynamique de nouvelles idées de conception. Les concepteurs ne dessinent pas seulement des croquis pour extérioriser les idées qui sont déjà consolidées dans leurs esprits, mais ils esquissent pour essayer des idées, habituellement vagues et incertaines (Iordanova, 2009). En examinant les esquisses, les concepteurs peuvent repérer des problèmes ou des solutions qu'ils n'avaient pu prévoir. De plus, ils peuvent voir de nouvelles relations parmi les éléments qu'ils ont dessinés, ces découvertes fortuites favorisant l'émergence de nouvelles idées et le raffinement de celles-ci. Par exemple, un architecte dessine fréquemment des formes, lignes, flèches sur le papier pendant l'esquisse.

Les travaux sur l'influence des esquisses sur le processus de conception seront abordés au chapitre 2. La section suivante aborde, un autre médium d'aide très utilisé par les architectes mais peu analysé dans le domaine des « études cognitives en conception ».

2.2.2.2 Les maquettes

Malgré l'usage fréquent des maquettes dans les domaines académiques et professionnels comme artefacts de formation, de représentation et de communication des projets architecturaux, peu de travaux se sont concentrés sur l'influence ou l'apport de ce médium dans le domaine architectural. Ce sont surtout les concepteurs industriels qui ont étudié ce médium, notamment à cause de l'échelle des produits/solutions dans ce domaine. Pourtant Romer et al. (2001) ont recensé que pour la phase conceptuelle, 96% des concepteurs et ingénieurs allemands utilisaient l'esquisse et 56% la maquette. Même si ces chiffres datent quelque peu et concernent d'autres domaines de la conception, il demeure que ces deux outils sont importants pour toute activité de conception.

Les maquettes peuvent être classées selon plusieurs critères (Scali et al, 2002) : le matériau utilisé (pâte à modeler, carton, papier, etc.), le niveau de complexité (simple ou détaillée), les techniques de réalisation (à la main, prototypage rapide, etc.). Par ailleurs, chaque discipline utilise les maquettes selon les critères qui y sont adaptés. Il existe aussi une taxonomie des maquettes en fonction de leur rôle dans le processus de conception : soit les maquettes conceptuelles (Physical Concept Models, PCM) utilisées dans les premières

phases du processus de conception et qui sont décrites comme simples de fabrication (Scalli et al., 2002). Par opposition, les maquettes de présentation, plus complexes et plus détaillées, sont surtout utilisées comme support pour la communication des idées aux clients ou partenaires dans les dernières phases du processus de conception. Comme pour les esquisses, les maquettes conceptuelles doivent posséder une certaine forme d'ambiguïté, de flou (Broek et al., 2001). Ce caractère « non fini » des maquettes conceptuelles permet l'évolution des idées qui ne sont pas figées à cette étape, mais il est aussi imposé par le temps nécessaire pour réaliser la maquette. Cependant, pour Horneker (2007, p.3), même les maquettes conceptuelles imposent une certaine rigidité par rapport aux esquisses notamment à cause de leur matérialité: « Models enforce greater precision when positioning objects than a sketch would do ». Comme pour l'esquisse, l'expression « raisonner avec ses mains » reprend le paradigme développé par Schön sur l'importance de la « conversation » entre le concepteur et l'idée qu'il veut représenter.

Contrairement à l'esquisse, la maquette coûte plus cher à réaliser et nécessite plus d'effort et de temps mais son principal avantage demeure sa représentation 3D et son réalisme : Ainsi comme le rappellent Iennings et al. (2001), une maquette doit être facilement modifiable, flexible et doit aussi fournir un « feedback » rapide. En manipulant les maquettes, les concepteurs peuvent faire l'expérience de l'espace 3D, sans que celui ne soit transformé mentalement, comme c'est le cas avec l'esquisse où le concepteur doit faire des opérations mentales pour percevoir en 3D son idée. Pour les clients ou les autres intervenants dans le processus de conception, les maquettes constituent un moyen efficace et intuitif pour comprendre les relations géométriques des espaces conçus et à construire.

L'autre caractéristique spécifique aux maquettes, est l'utilisation pour le concepteur d'un second sens : l'interaction bi-manuelle avec les matériaux à modeler et à façonner pour représenter ses idées. Cette combinaison des processus visuo-moteurs peut constituer un atout à l'idéation architecturale mais malheureusement aucune étude dans le domaine n'a quantifié cet apport. Les auteurs, surtout dans le domaine du design industriel, suggèrent que « the modality of two-handed exploration seems relevant for shape perception » (Scalli & al., 2002, p.5); ou comme le soutiennent Brereton et McGarry (2000), le caractère

tangible de la maquette et la possibilité d'utiliser au moins deux modalités ou sens est pertinent pour les processus de conception.

Dans le domaine de la conception architecturale, très peu d'études ont analysé et documenté l'apport des maquettes comme medium de conception. Des études dans d'autres domaines de la conception, surtout en design industriel, ont montré que la quantité de détails dans les prototypes affecte la qualité de conception finale. Yang et Epstein (2005) ont montré que les étudiants qui ont créé des prototypes avec moins de détails avaient des conceptions de qualité supérieure, cela suggère à nouveau que l'ambiguïté séminale dans le processus de conception peut être importante et conduire à moins de fixations; une fixation étant définie comme l'incapacité de développer d'autres idées, le concepteur restant avec une seule idée en tête. Acuna et Sosa (2010) ont comparé l'utilisation de la maquette et des esquisses dans le domaine du design industriel. 25 étudiants de seconde année devaient concevoir un présentoir à friandise, en utilisant soit des esquisses (groupe de contrôle) soit des maquettes (carton, pvc). Les participants disposaient de deux sessions de trois heures pour réaliser leur artéfact qui a ensuite été soumis à l'évaluation de deux enseignants. Ces derniers ont évalué les projets selon deux critères de créativité, soit l'originalité et la fonctionnalité. Les résultats montrent que l'utilisation de la maquette a généré des produits plus fonctionnels mais moins originaux que ceux réalisés avec l'esquisse, même si la différence entre la qualité des résultats n'était pas si grande. Les auteurs suggèrent que les deux media peuvent jouer un rôle complémentaire dans les premiers stades de l'idéation.

En résumé (Scali et al., 2002; Broek et al., 2001; Hornecker, 2007), la maquette est un medium tangible qui permet aux différents intervenants du processus de conception d'avoir une « expérience perceptuelle et multisensorielle » du projet, une interaction bi-manuelle avec les matériaux et elle fournit un feed-back (retour) en temps réel des modifications effectuées.

2.2.3 Les « CAD » (logiciels 3D)

Comparativement aux travaux sur le rôle des esquisses dans le processus de conception, peu de recherches empiriques ont étudié l'idéation utilisant des media numériques. Par media numériques, seuls sont considérés les logiciels 3D de Conception Architecturale

Assistée par Ordinateur (CAAO). Les autres technologies numériques émergentes (Burkhardt et al., 2008), comme les environnements de « Réalité Virtuelle » ou de « Réalité Augmentée », ne seront pas présentées dans le cadre de la présente thèse afin de circoncrire notre champs de recherche aux logiciels 3D les plus couramment utilisés dans les milieux académiques et professionnels (ici Sketch-Up). Decortis et al. (2005) soulignent qu'en dépit de l'abondance d'outils d'aide à la conception sur le marché, les architectes entament généralement les projets avec le crayon et le papier, et transfèrent seulement leur travail sur un ordinateur à la fin du processus, qui devient un outil de présentation. Cela signifie que la majeure partie du travail de conception est réalisée essentiellement avec des media conventionnels (Goel, 1995). Selon ces auteurs, ce choix peut être attribué au fait que les outils numériques exigent un niveau élevé de précision et ne laissent aucune ambiguïté. Or ces facteurs de liberté et d'abstraction sont nécessaires dans les premières phases du processus de conception. Cependant, certaines études (Bilda et Dermirkan, 2003; Madrazo, 1999) ont suggéré que des représentations visuelles numériques peuvent être employées pour une meilleure compréhension des formes et comme soutien de la pensée visuelle. Marx (2000) soutient que la visualisation intensive et la rétroaction immédiate de l'ordinateur vont influencer le concepteur et la formation de ses images mentales.

Il est évident que les logiciels 3D de CAAO qui, en deux décennies ont vu leur utilisation se généraliser dans les bureaux d'architectes, constituent un medium riche pour la représentation des idées de design. Toutefois, la recherche dans ce domaine (Bertol & Foell, 1997; Suwa & Twersky, 1997, Bilda & Demirkan, 2003, Tang & al., 2011) fait part d'un manque d'outils informatisés bien adaptés aux premières étapes du processus de conception. Mais depuis quelques années, des applications ayant des interfaces ergonomiques et faciles à manipuler comme Sketch-Up qui sont utilisées dans le cadre académique, sont aussi employées par les professionnels.

L'un des objectifs de notre travail de recherche est d'identifier quelles sont les caractéristiques (capacités spatiales, styles cognitifs) de l'utilisateur/concepteur qui influencent leurs performances lors de leurs interactions avec un logiciel 3D de CAAO. Par conséquent, la manière dont il extériorise leur pensée et in extenso influence le produit final.

Dans son ouvrage « architecture's new media : principles, theories and methods of CAD », Kallay (2004) propose un historique du développement des outils numériques. Selon lui, nous nous situons aujourd'hui « dans la quatrième génération d'outils numériques, des logiciels de CAO qui commencent à être utilisés selon leur vrai potentiel, soit celui d'outil de conception ». Gero (2007) va jusqu'à proposer un changement dans le sens du premier 'A' dans l'abréviation CAD (Computer Aided Design, en anglais), ainsi la Conception Assistée par Ordinateur deviendrait Conception Augmentée par Ordinateur. Par ailleurs, ces nouveaux outils bénéficient de plus en plus d'une « greffe de *technologies cognitives* (Borillo, 2005) sur les dispositifs techniques « *qui constituent les socles des sociétés de l'Information et de la Communication* ». Pour Iordanova (2009), les contributions de la psychologie cognitive et de la neuropsychologie pourraient être bénéfiques à plusieurs niveaux, notamment, pour créer de bons outils de conception basés sur les potentiels et les limites des utilisateurs de ces systèmes. Par ailleurs, par la fréquence de leur usage, ces logiciels 3D intègrent de mieux en mieux les deux dimensions d'utilité et d'utilisabilité traditionnelles en ergonomie informatique, contrairement aux systèmes de réalité virtuelle par exemple (Burkhardt, 2003).

La section suivante, porte sur les caractéristiques des logiciels 3D ainsi que leur utilisation et leur utilité dans le processus de conception. Par la suite, nous abordons leur influence sur les principaux processus cognitifs de la conception architecturale, que nous avons choisi d'étudier, c'est-à-dire l'imagerie mentale et la charge cognitive.

2.2.3.1 Les caractéristiques des logiciels 3D

Dans le cadre de cette thèse, un logiciel 3D de CAAO fait référence à tout système, logiciel ou application informatique qui permettent de générer des espaces virtuels/maquette numériques (en mode shade ou rendu) et d'interagir (navigation et manipulation) en 3D et en temps réel. Des logiciels tels que Sketchup, ArchiCAD ou REVIT sont des logiciels parmi les plus utilisés en architecture, dans les domaines académiques ou professionnels. Les logiciels 3D se différencient des 2D par la possibilité de disposer d'un modèle 3D, dynamique, qui peut être manipulé et vu sous différents angles, de l'intérieur comme de l'extérieur en temps réel. De plus, ce modèle 3D peut générer des représentations finales

avec un minimum d'effort. Le réalisme⁸ ou photoréalisme, est aussi un des avantages des modèles 3D car il permet de valider les représentations du projet et ainsi de valider formellement ce dernier en termes de critères esthétiques.

La principale caractéristique du logiciel 3D est l'interaction en temps réel. Interagir avec le modèle 3D, le transformer et le modifier en temps réel permet une évaluation et sélection rapides des hypothèses de design. De plus le logiciel 3D permet non seulement l'évaluation de la géométrie, de la forme du projet à concevoir mais également de d'autres facteurs importants pour l'évaluation d'une idée de conception tels que la lumière, les textures textures et d'autres ambiances qui peuvent affecter la compréhension et la perception des espaces pour tester les hypothèses de conception. Cette simulation interactive permet aussi de communiquer ses idées aux autres acteurs du projet (client, ingénieur, entrepreneur, etc.).

Le logiciel 3D en temps réel n'a, à notre connaissance, jamais été étudiée de manière quantitative, c'est-à-dire mesurée objectivement dans le domaine de la conception architecturale; le programme du CRSNG dans lequel s'inscrit cette recherche tente de documenter cette problématique. Généralement, les auteurs suggèrent plutôt des assomptions et des inférences, inspirées par la littérature ou leurs observations, sur le potentiel des logiciels 3D.

Pour Kalay (2004), l'emploi du logiciel 3D offre le potentiel de changer la communication lors du processus de conception : la communication « intra » (conversation réflexive entre le concepteur et ses représentations) mais aussi la communication « extra » avec les autres acteurs du processus). Ce nouvel outil de conception permettent aussi de restructurer l'architecture comme profession car ces systèmes peuvent améliorer la productivité des outils traditionnels. Kallay (2004) établit 6 propriétés de ces systèmes informatiques comme essentielles à ce changement de paradigme :

(1) **La flexibilité**, soit la possibilité de changer les niveaux d'abstraction (plans en mode filaire/lignes cachées/rendu, perspectives, coupes, élévations) autant que l'on souhaite sans avoir à reconstruire la représentation à partir de zéro (« from scratch »). L'ordinateur, qui contient les éléments de l'artefact modélisés et stockés (murs, ouvertures, forme de la

⁸ Le réalisme est une notion assez subjective liée aux domaines perceptif et visuel (Burkhardt, 2003),

toiture, etc.), peut assister le concepteur en lui fournissant les niveaux de représentation dont il a besoin pour faire évoluer ses représentations, notamment, en cachant certains détails ou en mettant en exergue d'autres aspects du modèle qui faciliteront par la suite l'atteinte de la solution optimale. Cette flexibilité au niveau des représentations, en plus de réduire la charge cognitive et la perte de temps liées à la modélisation des différentes représentations, permet aussi de diminuer les erreurs introduites par inadvertance lors du changement de point de vue ou de mode de représentation.

(2) **L'interconnexion** (« interlinking »), soit la capacité de lier des informations représentées sous différentes formes. Si une représentation est modifiée, les autres le sont aussi : si le modèle numérique 3D est modifié, il le sera autant en plan qu'en élévations ou en perspectives, etc.

(3) **La gestion de l'information**, soit la capacité d'organiser et d'accéder à des ressources d'informations complexes : importer des bibliothèques d'objets, ajouter des informations sémantiques aux primitives composant le modèle.

(4) **La visualisation**, soit la capacité de produire des images et animations photo-réalistes d'un environnement, d'un projet ou d'un artéfact non existant. Il est maintenant possible aux concepteurs de valider leurs intuitions et leurs idées rapidement, en temps réel, en changeant et en obtenant visuellement le résultat de leurs modifications, par exemple pour l'ensoleillement, le changement de matériaux, la qualité des espaces intérieurs, etc. Mais l'un des plus grands avantages des logiciels 3D par rapport aux autres outils de représentation est la possibilité de se déplacer à l'intérieur de l'artéfact à concevoir, contrairement aux maquettes. Ce qui change la relation entre le concepteur et l'objet à concevoir en accentuant ainsi le sentiment de présence.

(5) **L'intelligence des systèmes**, soit la capacité d'intégrer des règles, des contraintes dans la représentation elle-même, la rendant active, plutôt que passive dans le processus de design. Des logiciels de conception paramétrique tel que REVIT contiennent de telles règles qui peuvent influencer la conception (emplacement/dimensions des escaliers, ouvertures, etc.), d'autres logiciels paramétriques vont faire émerger des formes (Rhino + Grasshopper).

(6) **L'interopérabilité**, soit la possibilité de partager l'information rapidement entre différentes applications et avec les autres acteurs du processus de conception de manière synchrone ou asynchrone.

2.2.3.2 Influence des medias numériques sur le processus de conception

L'introduction de ces nouvelles technologies et l'émergence de nouvelles pratiques architecturales suggèrent que la profession se trouve actuellement face à un dilemme : utiliser ces nouveaux outils de manière à véritablement assister la conception traditionnelle et alors accepter que l'architecte soit de plus en plus influencé par ces systèmes informatiques qui jouent un rôle de plus en plus déterminant dans la conception architecturale. Kalay (2004, p.477) résume ce dilemme en utilisant deux métaphores: '*the square-peg-in-a-round-hole*' et '*the horseless carriage*'. Selon cet auteur, le premier « *requires a clear identification of the different actions that comprise the design process and developing computational tools that can truly be of assistance. This amounts to "rounding off" the square peg* ». Et le deuxième « *views technology as means to alter the self-perception of a practice as it is transformed by a new technology*».

La plupart des recherches cognitives dans le domaine de la conception, et la nôtre en fait partie, ont été effectuées sur le premier paradigme mentionné. Elles ont comme objectif de bien comprendre les processus cognitifs pour pouvoir développer une assistance informatique adéquate. Comme le rappelle Huot (2005, p.15), une meilleure intégration des systèmes informatiques passe avant tout par une adaptation de leurs interactions avec l'utilisateur, plutôt qu'une approche système⁹. Il s'agit de s'inscrire dans un « *principe d'interface écologique, où chaque action réalisable et chaque but possible sont clairement accessibles et lisibles, sans pour autant être imposés* ». Le concepteur demeure toujours maître du processus, il décide des contraintes à prioriser et des formes à concevoir, entre autres par l'utilisation de l'algorithmique (la programmation) pour concevoir.

Dans le domaine de la conception, plusieurs laboratoires de recherche en psychologie et ergonomie cognitive se sont intéressés à l'apport de ce médium, car plusieurs avantages y

⁹ Comme dans les premiers systèmes de CAO/DAO, la première préoccupation a été de fournir les méthodes de calculs, les modèles analytiques permettant de répondre à des problèmes précis et à améliorer la productivité.

sont reliés (Darken et Patterson, 2002 ; Waller et al., 1998). Les maquettes numériques créées, notamment, grâce aux logiciels 3D permettent d'évaluer les habiletés spatiales. Les maquettes numériques permettent l'étude du transfert des connaissances spatiales acquises au monde réel. Par transfert des connaissances spatiales, il faut comprendre que les habiletés et connaissances spatiales acquises dans le monde virtuel peuvent servir à améliorer la conception des espaces réels ou à se déplacer efficacement dans l'environnement réel. A notre connaissance, aucune recherche n'a traité de la formation des images mentales lors de l'utilisation des logiciels 3D que ce soit dans des espaces virtuels immatériels ou des espaces qui simulent des espaces réels.

La charge cognitive est souvent mentionnée lorsqu'il s'agit de l'utilisation des logiciels 3D. Dans le domaine de la conception et plus spécifiquement des « cognitive design studies », peu de recherches se sont intéressées à la charge cognitive comme facteur influençant le design (Dorta et al., 2007, 2008; Bilda et Gero, 2007) où une mesure subjective de la charge cognitive, le NASA TLX, a été utilisée. A notre connaissance, aucune étude n'a quantitativement étudié l'incidence de la charge cognitive sur le processus de conception et l'idéation architecturale lors de l'utilisation d'un logiciel 3D. Ces différents travaux ainsi que la théorie suggèrent que l'extériorisation de l'information visuo-spatiales (imagerie mentale) est nécessaire afin de libérer la mémoire de travail de façon à ce que les autres tâches puissent être menées efficacement. Cependant au niveau de l'interaction avec le système informatique, les auteurs (Lebahar, 2007; Bonnardel, 2006; Goel, 1995) observent des contraintes dans l'utilisation de ces systèmes, puisque les concepteurs doivent se conformer à de nombreuses étapes imposées et quantifier de façon exacte la plupart des actions qu'ils entreprennent. Falzon (2004) se demande dans quelle mesure cela risque de constituer une double activité pour les concepteurs et mobiliser d'importantes ressources attentionnelles; ces dernières n'étant pas dédiées à la tâche principale de conception.

Un dernier point important concernant toutes les études sur l'utilisation de media numériques : il est toujours difficile de généraliser les résultats des recherches utilisant ces outils numériques, car chaque medium a ses propres spécificités et commandes (une interface), et offre un potentiel différent. Il n'est pas approprié de soutenir que les logiciels 3D, en général, nuisent à l'idéation car ils imposent une charge cognitive additionnelle ou

ne facilitent pas l'extériorisation des idées mentales à cause de leur demande de précision à l'utilisation. Contrairement aux dessins ou à la réalisation de maquettes qui dépendent essentiellement des habilités du concepteur (talents, compétences, connaissances) pour créer, les recherches concernant les systèmes informatiques sont basées sur des systèmes informatiques, des interfaces différents (FormZ, Sketchup, Rhino, Revit, etc.).

2.3 Synthèse : proposition d'un modèle cognitif de la conception architecturale

Le modèle des 4P de Rhodes (1961) sert de base à notre recherche. Tel que documenté précédemment, un architecte doit posséder et acquérir des attributs particuliers qui lui permettent d'être créatif dans sa manière d'explorer les problèmes de conception ouverts, d'utiliser des stratégies novatrices durant le processus de conception pour produire une solution « satisfaisante », originale et créative ; le tout en tenant compte de l'environnement dans lequel il évolue et du matériel ou media qu'il utilise pour créer. Ce modèle des 4P adapté à la conception architecturale selon une approche cognitive est présenté sur la figure 12. La traduction des 4P n'étant pas toujours adéquate, des termes plus appropriés sont utilisés, le cas échéant, dans le modèle :

- **Concepteur (Person).** En nous basant sur le modèle multivarié de Lubart, (2003), l'architecte doit posséder plusieurs compétences. Dans le cadre de cette recherche exploratoire ou plusieurs facettes de la conception sont étudiées, il a fallu faire un choix quant aux compétences à analyser. Une revue de la littérature présentée dans le prochain chapitre, permettra de mettre en évidence une aptitude importante pour les architectes: les capacités spatiales.
- **Processus (Process).** À toutes les phases de ce processus, un cycle d'exploration-génération-évaluation, défini comme l'idéation, nécessite un besoin de représenter mentalement (par le biais d'images mentales visuelles surtout) ou physiquement (par le biais de media d'aide à la conception) les différentes alternatives et idées. Pour se développer, les images mentales, générées dans le calepin visuo-spatiale de la mémoire de travail, résultant de l'encodage et la récupération des connaissances

emmagasinées dans la mémoire à long terme. Cette activité requiert des ressources cognitives, ainsi que l'interaction avec les divers media d'aide à la conception architecturale. Une des questions de recherche est de savoir si ces différents media imposent une charge cognitive additionnelle au concepteur durant sa tâche.

- **Medium d'aide à la conception (Place/Environment).** Dans le cadre de cette recherche, seule une composante de l'environnement matériel est étudiée, soit le medium d'aide à la conception. Trois media ont été choisis car ils sont couramment utilisés dans les milieux académiques et professionnels : l'esquisse, la maquette et le logiciel 3D: SketchUp.
- **Artéfact (Product).** Il s'agit de la solution architecturale « satisfaisante » générée qui doit être adaptée, fonctionnelle et originale.

Les deux premiers chapitres ont permis de présenter les différents concepts inclus dans le modèle de la figure 11. Le prochain chapitre 3 a pour objectif d'opérationnaliser le modèle en décrivant les moyens et méthodes pour évaluer ces concepts, de manière qualitative et quantitative.

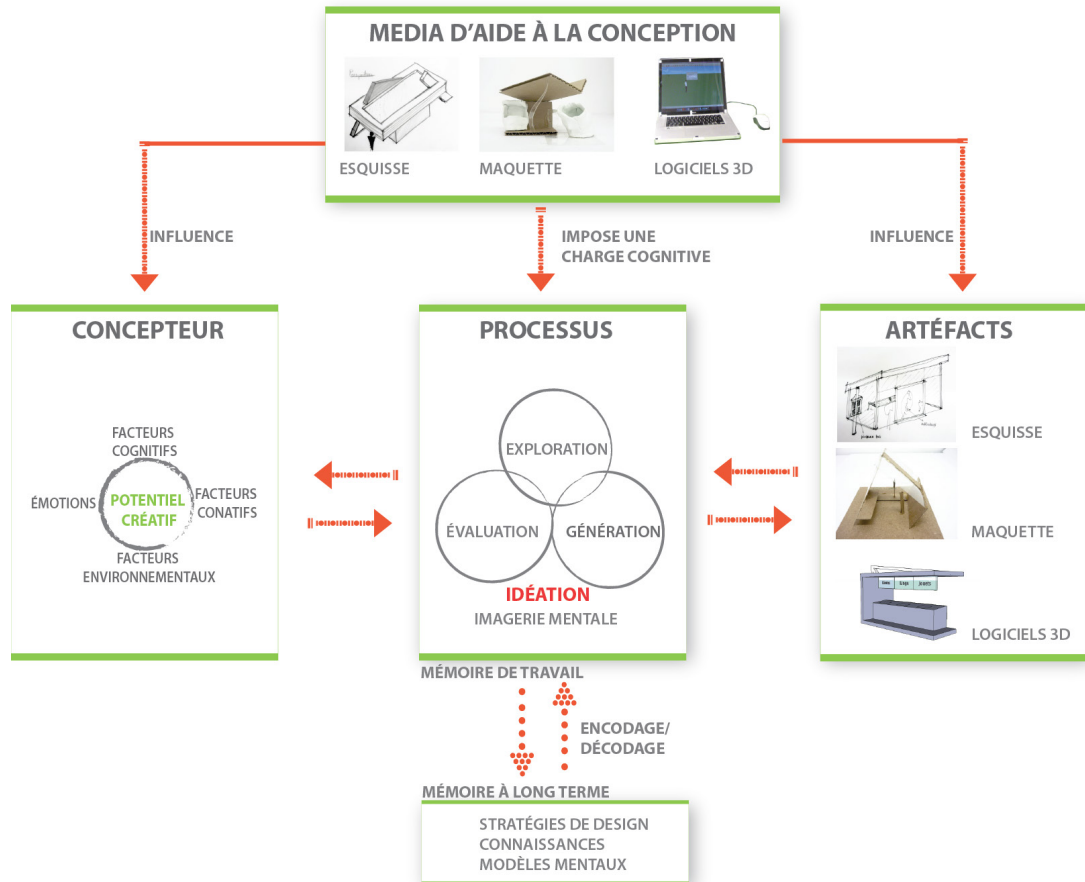


Figure 11: Proposition d'un modèle cognitif de la conception architecturale

Chapitre 3

Opérationnalisation du modèle cognitif de la conception architecturale

Ce troisième chapitre a pour objectif d'opérationnaliser le modèle théorique présenté à la fin du chapitre précédent. En se basant sur les quatre composantes de ce modèle, soit le concepteur, le processus, l'artéfact ainsi que le medium d'aide à la conception, une recension des mesures, qualitatives et quantitatives, de ces concepts est présentée.

L'approche mixte, préconisée dans le cadre de cette recherche et qui sera présentée au chapitre suivant, va structurer ce chapitre puisque les mesures qualitatives et quantitatives de chaque composante du modèle théorique sont illustrées et documentées. Dans une première partie, deux caractéristiques importantes du concepteur sont présentées et analysées, soit l'expertise et les capacités visuo-spatiales, et les mesures de ces dernières. La seconde partie du chapitre traite des mesures de la charge cognitive et de l'imagerie mentale alors que la troisième partie aborde les méthodes qualitatives d'évaluation des artéfacts. Enfin, la dernière partie récence les méthodes utilisées pour analyser l'incidence des media dans le domaine de la conception architecturale.

3.1 Les principales caractéristiques du concepteur

En psychologie de la créativité, plusieurs modèles ont été développés et présentés dans les chapitres précédents (Amabile, 1996; Csikszentmihalyi, 1996). Pour la présente recherche, l'approche multivariée de la créativité Sternberg et Lubart, (1995) et Lubart, (2003) est choisie pour la variété de ses facteurs et les liens entre ces derniers. La littérature dans le domaine de l'ergonomie cognitive et de la conception (Visser, 2006; Ho, 2006; Lebahar, 2007; Yukhina, 2008) mettent en évidence l'importance deux aptitudes en architecture : l'expertise et les capacités visuo-spatiales (deux facteurs cognitifs selon le modèle de Lubart, 2003). L'expertise est déterminante pour les architectes car elle leur permet, entres autres, de développer des stratégies cognitives pour trouver des solutions créatives aux problèmes de conception; alors que les capacités visuo-spatiales sont

essentielles pour générer et transformer des formes et des volumes dans l'espace 3D. D'autres facteurs sont considérés comme déterminants pour un architecte, comme ses traits de personnalité, sa motivation, ses habiletés créatives dont la pensée divergente, etc. Dans le cadre de cette thèse, les capacités spatiales sont étudiés. Cette activité cognitive des concepteurs, fait référence à « la manière dont une personne utilise ses connaissances et autres sources d'information auxquelles elle fait appel » (Visser, 2006). Mais avant de décrire ces capacités et ses mesures, introduisons le concept d'expertise qui permet de comprendre l'activité des concepteurs.

3.1.1 Experts versus novices

Il existe deux manières de définir l'expertise : une définition « élitiste » qualifiant d'experts des individus ayant des capacités (talents) extraordinaires ou une définition plus pragmatique et plus inclusive. La plupart des chercheurs en psychologie et ergonomie cognitive (Visser, 2006a; Weisberg, 2006; Lawson et Dorst, 2009) font référence à la seconde définition qui rejoint par ailleurs l'usage courant de l'expertise : l'expert est un individu possédant de grandes connaissances résultant d'une longue pratique dans un domaine spécifique. Pour Weisberg (2006), psychologue de la créativité, l'expertise réfère à une capacité de performance constante qui résulte de l'expérience, sans égard à la manière dont cette capacité a été acquise, un individu pouvant devenir un expert¹⁰, après des années de pratique et d'études. Pour Visser (2006b, p.3), l'expertise peut se définir au niveau cognitif en termes d'interaction, d'organisation et de traitement des connaissances qui diffèrent de celles des novices : « les experts sont capables d'inférer des informations absentes des spécifications de la tâche et, lors de leur analyse de celles-ci, d'en construire une représentation organisée pour effectuer la tâche ».

À la lecture des différentes recherches sur l'expertise dans le domaine de la conception citées, il ressort qu'il n'existe pas de normes ou de tests psychométriques standardisés pour évaluer l'expertise d'un individu. Les chercheurs se réfèrent souvent aux années de pratique ou d'étude des individus pour déterminer leur niveau d'expertise. Dreyfus et Dreyfus (1980) ont proposé un modèle générique de l'expertise, basé sur le caractère acquis de cette

¹⁰ Il est généralement reconnu qu'il faut une période de 10 ans pour former ou devenir expert en un domaine de connaissance ou pratique donné.

dernière. Il distingue six niveaux croissants d'expertise qui correspondent à la manière dont les individus perçoivent, interprètent, structurent et résolvent les problèmes. Ces six niveaux sont les suivants :

1. **Le novice/débutant (« novice »)** qui va suivre des règles strictes pour traiter le problème à résoudre;
2. **Le débutant avancé (« advanced beginner »)** accorde davantage d'attention aux données du problème et ne suit pas les règles à la lettre comme le novice;
3. **Le compétent (« competent »)** va sélectionner des éléments du problème selon leur pertinence. Il développe un plan pour atteindre son but, en discernant le caractère opportuniste de la conception;
4. **L'expert (« expert »)** répond intuitivement au problème de conception et prend les mesures appropriées pour répondre de façon adéquate à la situation. Selon Dreyfus, la majorité des professionnels ne dépassent pas ce quatrième niveau;
5. **Le maître (« master »)** dispose d'un sens aigu du contexte et détecte les indices plus subtils qui vont lui permettre de résoudre le problème. Il se différencie des professionnels qui procèdent (les experts) non pas de façon intuitive ou naturelle mais plutôt sur la base d'une solide formation.
6. **Le visionnaire (« visionary »)** essaie de développer de nouvelles façons de faire, il opère davantage dans les marges du domaine des connaissances et est ouvert aux autres domaines qui pourraient faire évoluer son propre domaine.

Lawson et Dorst (2009) critiquent ce modèle trop généraliste et sériel. Toutefois en analysant les auto-évaluations d'étudiants des trois premières années en design industriel de l'Université de Eindhoven, ces auteurs ont constaté que les trois premières phases du modèle de Dreyfus correspondent à l'évolution d'un étudiant en design au cours de ses trois années d'études.

Dans le domaine de la conception, plusieurs travaux en études cognitives ont traité des différences de stratégies utilisées par les experts et par les novices (Goker, 1997 ; Stones & Cassidy, 2007 ; Visser, 2006 ; Kavakli & Gero, 2001; Yukhina, 2008 ; Lawson & Dorst, 2009 ; Tang & al., 2011). Pour résumer ces recherches, on peut situer la différence entre experts et novices en fonction de la productivité, de la charge cognitive et des stratégies de design utilisées. En réalisant plusieurs expériences (Kavakli & Gero 2001 et 2003), ces auteurs ont analysé l'idéation lors de la phase conceptuelle par l'analyse de protocoles verbaux d'experts et de novices. Ils ont montré que l'activité cognitive de l'expert et sa productivité sont généralement trois fois supérieures que celle du novice, en terme de génération d'esquisses et de génération d'idées. Pour ces auteurs, l'explication serait due à des stratégies différentes employées par les deux groupes pour résoudre les problèmes de conception. Pour Kavakli et Gero (2003, p.42), les résultats de leurs propres travaux soutiennent l'idée que les individus acquièrent et développent des stratégies différentes avec l'expérience, ce qui leur permet de structurer leurs connaissances, sans surcharger leur mémoire de travail : « The expert's strategic knowledge allows him to use a smaller number of processes and to form different groupings of processes ». Ces études sur l'expertise étaient de nature qualitatives, basées sur l'analyse des observations ou la verbalisation des participants. À notre connaissance, seule l'étude de Goker (1997) a utilisé une mesure physiologique pour comparer experts et novices, à l'aide d'enregistrement d'Électro-Encéphalo-Gramme (EEG). Ses conclusions suggèrent que les experts utilisent beaucoup moins le raisonnement verbal et abstrait et beaucoup plus de raisonnement visuo-spatial. Ces résultats soulignent, entre autres, l'importance des capacités visuo-spatiales pour les architectes.

Par ailleurs, depuis une dizaine d'années, plusieurs études ont comparé l'influence des différents media d'aide à la conception (esquisses et divers logiciels de conception) en fonction de l'expertise des concepteurs (Kavakli & Gero, 2001; Stones & Cassidy, 2006; Tseng, 2007; Tang & al., 2011). Sans passer en revue tous ces différents travaux, notons par exemple les conclusions de Tseng (2007) qui a analysé le caractère flou et ambigu des esquisses produites par les novices et les experts. Ses résultats suggèrent que les divers degrés d'ambiguïté des esquisses sont significativement liés à la quantité d'idées générées

par les experts alors que les novices créent plus d'esquisses dont l'ambiguïté est moindre. Concernant les logiciels 3D d'aide à la conception, Tang et al., (2011) ont comparé le processus de conception des novices qui utilisaient l'esquisse à main levée et une tablette qui permet d'esquisser numériquement. Leurs résultats n'indiquent aucune différence entre les deux media en termes d'actions cognitives. Les explications avancées par les auteurs font référence à l'âge des participants (moyenne de 20,35) et leurs compétences en tant « qu'autochtones numériques » (en angl. « digital natives »). Les auteurs reprennent la taxonomie de Prensky (2001a) qui sépare les autochtones numériques, soit des individus qui sont nés et ont évolué dans une culture numérique, des « immigrants numériques » (en anglais, « digital immigrants ») qui ont acquis sur le tard cette culture numérique. Pour Prensky (2001b), les deux groupes d'individus agissent différemment avec les media numériques.

La présente recherche est consacrée à l'étude de l'idéation architecturale dans un cadre académique, avec des débutants avancés et des compétents selon le modèle de Dreyfus. L'objectif de cette section n'est pas d'analyser les différences de stratégies cognitives employées par les concepteurs mais plutôt de souligner le caractère acquis des connaissances et de leur organisation. Dans le domaine architectural, il a été soulevé que les capacités spatiales sont des connaissances essentielles pour les concepteurs. La section suivante analyse leur importance et propose leur opérationnalisation.

3.1.2 Les capacités visuo-spatiales

Yukhina (2007) a effectué une revue de la littérature des cinquante dernières années sur les différentes capacités (« abilities ») ou compétences / habiletés (« skills ») essentielles à la conception architecturale. Il en ressort que les capacités visuo-spatiales sont les principales aptitudes que doit posséder un architecte dû à la nature des données visuo-spatiales 2D et 3D qu'il doit traiter, analyser et organiser que ce soit au niveau cognitif ou physique lors de l'interaction avec ses représentations externes. Plusieurs auteurs (Lawson, 2005; Cross, 2007; Ho, 2006; Ho et Eastman, 2006; Sutton & Williams, 2006; Keener & al., 2008; Yukhina, 2007; Casakin, 2008) soutiennent cette assertion quant à l'importance des capacités spatiales, mais ne les classent pas forcément comme prioritaires par rapport à

d'autres compétences comme le raisonnement analogique, les capacités d'association, etc.. Ho (2006) relève que dans certains pays comme la Thaïlande et Singapour, la réussite aux tests de capacités spatiales est un pré-requis pour étudier en architecture, comme ce fut le cas aux États-Unis durant les années 1960 et 1970 avec le test d'aptitude AAT « Architecture Aptitude Test ». Ce test a été par la suite abandonné lorsque l'organisme national en charge de ces tests (Educational Testing Services) ne l'a pas considéré comme un outil suffisant pour prédire la réussite académique.

Dans le cadre de cette thèse, la définition de Lean et Clements (1981) des capacités visuo-spatiales est reprise, soit la capacité de former des images mentales et de les manipuler qui rejoint la définition de Ekstrom et al. (1976) décrivant les capacités comme des aptitudes à manipuler ou à transformer des images et des structures spatiales. Linn et Petersen (1985) rajoutent la capacité de rappeler les informations spatiales (« spatial recall »), en plus de les produire, représenter et transformer. Ces définitions rappellent la définition des images mentales. Il faut cependant faire une différence entre l'approche cognitive des images mentales basée sur l'approche du système de l'information présentée dans le chapitre précédent et l'analyse factorielle de ces capacités visuo-spatiales qui est développée dans la présente section qui traite des profils et des connaissances des concepteurs. En effet, l'approche factorielle des capacités spatiales cherche « à identifier les profils des individus, tandis que celle des images mentales a pour objectif de comprendre les processus de traitement de l'information. » (Tyndiuk, 2005, p.66).

L'approche factorielle des capacités spatiales est issue des travaux sur l'intelligence qui date du début du siècle dernier, (Spearman et Wynn Jones, 1950, Thrustone, 1938). Cette approche, se base sur une analyse statistique factorielle (corrélations) entre les tests cognitifs (capacités spatiales, verbales, compréhension, etc.) afin de voir s'il existe des groupes de tests qui corrélerent davantage entre eux qu'avec d'autres. Ces analyses servent à trouver le point commun, le facteur commun entre plusieurs tests. Lohman (1988) qui a ré-analysé les données de 35 recherches sur les capacités spatiales, a proposé un modèle factoriel hiérarchisé des capacités spatiales (cf. figure 12). Selon ce modèle qui est repris dans le domaine de la conception par Ho (2006) et Yukhina, (2007), il existe trois niveaux

de facteurs classés selon la complexité du stimulus. Le niveau de complexité peut aussi être décrit en fonction de la rapidité à répondre à la tâche. Ainsi, dans la partie inférieure du modèle (fig. 12), les participants effectuent généralement les tâches le plus rapidement possible alors que les tâches, dans la partie supérieure haut du modèle, nécessitent plus d'effort cognitif (« cognitive power », selon Lohman). De plus, ces différents facteurs vont fusionner dans le haut du modèle, soit le facteur g . Ce facteur g ¹¹ réfère à la notion d'intelligence générale qui affecte la performance dans toutes les tâches cognitives complexes telle que la conception architecturale.

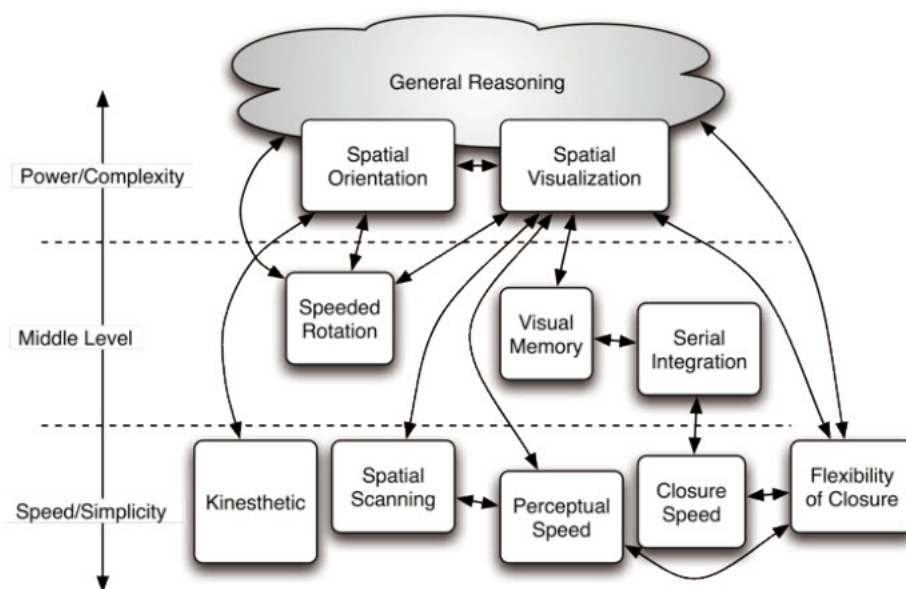


Figure 12 : Modèle hiérarchique des capacités spatiales selon Lohman (issue de Ho, 2006)

Comme le rappelle Tyndiuk (2005), ce modèle de Lohman, qui fait consensus, met en évidence deux facteurs importants des capacités spatiales : l'orientation et la visualisation spatiale. L'orientation spatiale est surtout prise en compte pour déterminer le profil des

¹¹ Cette présente recherche étant multidisciplinaire et de nature exploratoire, notre objectif n'est pas d'exposer le débat qui existe entre les partisans de l'intelligence unidimensionnelle (facteur g) et multidimensionnelle (factorielles). Aujourd'hui, le modèle CHC de Carroll (1993), basé sur une revue de 460 études, semble faire consensus (Yukhina, 2008). La plupart des chercheurs admettent que l'intelligence est composée d'au moins trois niveaux : des aptitudes primaires (niveau 1, moins complexes) au facteur g (niveau 3), ce dernier donne une idée d'ensemble des compétences générales.

individus et leur capacité à s'orienter dans un espace réel ou virtuel (Mohamed-Ahmed, 2005; Waller et al, 2004).

Dans le domaine de la conception, pour Ho et Eastman (2006) ainsi que Yukhina (2007), c'est le facteur de visualisation spatiale qui importe lors du processus d'idéation architecturale. La visualisation spatiale peut être définie comme la capacité à effectuer mentalement des transformations géométriques, telles que des translations, rotations et réflexions. Les épreuves typiques de ce facteur sont des tests demandant d'imaginer des formes pliées ou dépliées. Dans le cadre de cette recherche, la visualisation spatiale et l'orientation spatiale seront étudiées dans le but de pouvoir comparer nos résultats avec les travaux de Yukhina (2007) et Ho (2006) pour ces deux facteurs.

Depuis les années 1960, plusieurs travaux ont montré des corrélations positives entre les performances académiques des étudiants en design (ou dans des domaines connexes) et leurs capacités spatiales. Ainsi, en génie, des chercheurs (Blasko & Holliday-Darr, 1999; Potter & Van de Merwe, 2001; Lajoie, 2003; Sorby, 2006) ont signalé que les étudiants qui réussissent moins bien dans les tests sur les aptitudes spatiales en 3D ont plus de risques d'échouer dans les cours de dessins et de conception. En design, les recherches actuelles suggèrent que les capacités visuo-spatiales peuvent être améliorées avec l'expérience. Cette approche par l'expertise (« expertise approach », de Ericsson & Smith, 1991) est soutenue par les travaux de (Salthouse, 1991) qui a trouvé que la visualisation spatiale des architectes déclinait rapidement après leur retraite professionnelle. Ho (2006) a fait passer des tests sur la rotation et la visualisation spatiale à 251 étudiants en architecture. Ses résultats ont mis en évidence qu'il existe une corrélation entre les capacités spatiales des participants (hommes), et leurs performances en atelier. Ho conclut qu'il semble exister un seuil minimum pour les étudiants en architecture, au dessus duquel, ce ne sont pas les capacités spatiales qui influencent la performance des étudiants mais d'autres compétences telle que la motivation, les styles cognitifs ou les connaissances dans le domaine.

Par ailleurs, il existe plusieurs tests psychométriques pour mesurer ces capacités visuo-spatiales tels que le « Structure ou Intellect Test » de Guilford (1981) qui mesure 120 différents facteurs intellectuels; le « *Differential Aptitude test Battery factors* »

de Bennett et al. (1975) qui mesure huit domaines incluant les capacités de raisonnement, le « *Woodstock-Johnson III tests of cognitive abilities* » (Woodstock et al., 2001), basé sur le modèle CHC de Carroll, (1993) qui contient 20 tests incluant le facteur *g*. La présente recherche s'appuiera sur le « *Kit of factors referenced cognitive tests* » de Ekstrom et al., (1976), qui permet de mesurer 72 facteurs dont les capacités spatiales incluant le facteur *g*. Plusieurs raisons justifient le choix de cette mesure :

- Elle a été validée et analysée empiriquement à plusieurs reprises au cours des trente dernières années notamment par Carroll (Yukhina, 2007).
- Elle comprend des tests de visualisation spatiale (test de pliage) et de rotation mentale (rotation spatiale)
- Il nous permet de comparer nos résultats avec les travaux de Ho (2006) et Yukhina (2007) qui ont utilisé cet outil comme mesure des capacités spatiales de leur participants. Par ailleurs, ces mêmes auteurs ont établi la validité interne de cette mesure.

Les capacités spatiales, essentielles à la formation des images mentales, nécessitent des ressources cognitives qui diffèrent selon l'expertise du concepteur. La section suivante présente une recension des différentes techniques d'évaluation de deux de ces processus cognitifs, soit la charge mentale et l'imagerie mentale.

3.2 Le processus : mesures de la charge cognitive et de l'imagerie mentale

Notre modèle théorique a montré l'importance de deux processus cognitifs durant le processus de conception architecturale, soit la charge cognitive et l'imagerie mentale (Bilda, 2006; Bonnardel, 2006). Les techniques de mesures qualitatives et quantitatives des ces deux processus sont présentées ci-dessous.

3.2.1 Les mesures de la charge cognitive

Il existe plusieurs types de mesures pour évaluer la charge cognitive d'un individu. On peut les regrouper en deux grandes familles, des mesures qualitatives reposant sur des données subjectives, c'est-à-dire basées sur la perception des sujets ou des expérimentateurs; et des mesures quantitatives reposant sur des données objectives, c'est-à-dire basées sur une mesure fidèle et quantifiable de l'objet à étudier par le biais d'un outil fiable, qui ne dépend donc pas de la perception des sujets ou des expérimentateurs.

3.2.1.1 Les mesures qualitatives

Il s'agit de tests psychométriques que l'on remet aux sujets de manière pré et post-expérimentale, et qui servent à recueillir leurs impressions ou réactions quant à leurs performances. Ward (1996) préfère le terme de mesures d'auto-évaluation (« self-report measure »). Trois tests sont particulièrement récurrents dans la littérature : le « Workload Profile » (Tsang & Velazquez, 1996), le S.W.A.T. (« Subjective Workload Assessment Technique », Reid & Nygren, 1988) et le NASA TLX (Task Load Index)(Hart, 1988). Il s'agit essentiellement de demander à l'utilisateur de produire un jugement sur l'effort mental qu'il a investi dans la tâche. Ces questionnaires sont probablement les plus utilisés car ils sont rapides et faciles à administrer, moins intrusifs et peu coûteux économiquement et en temps d'analyse des données. La principale faiblesse de ces questionnaires réside dans le fait qu'ils sont fondés sur la perception des participants, d'où l'aspect « subjectif » de la mesure qui ne correspond pas toujours à la réalité. D'autre part, ils laissent croire que la personne comprend précisément la notion de charge cognitive et est capable de s'auto-évaluer après la performance. De plus, ces questionnaires sont souvent réalisés a posteriori, ce qui constitue un biais supplémentaire si l'on tient compte de la capacité des participants à se souvenir avec précision de leurs impressions durant la tâche. Parmi ces tests, le NASATLX est considéré comme le plus sensible et le plus fiable reposant sur des mesures subjectives (Hill, et al., 1992). Le NASATLX est considéré comme multidimensionnels, il repose sur six paramètres évalués de 0 à 100 : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort et frustration. Il permet ainsi d'identifier lequel de ces paramètres peut causer une surcharge cognitive (Cegarra et Chevalier, 2008). Par ailleurs, il faut relever qu'une mesure subjective de la charge cognitive demeure utile pour caractériser la perception que les individus développent face à un système ou durant une

tâche. Cela faciliterait l'acceptation du système par ces utilisateurs (Farmer & Brownson, 2003).

3.2.1.2 Les mesures quantitatives

La première catégorie de mesures quantitatives considérée est celle des indices physiologiques. L'oculométrie, soit l'étude des mouvements oculaires, peuvent être considérés comme des indicateurs de la charge cognitive. Il existe plusieurs métriques fournies par l'oculométrie, tels que la pupillométrie (données concernant la dilatation pupillaire), le clignement des yeux ou encore le nombre et la durée des fixations (Klinger et al., 2008; Tungare, 2009).

Il existe d'autres mesures physiologiques comme l'ElectroCardioGraphie (pression sanguine, volume sanguin, etc.), l'électro-EncéphaloGraphie (rythmes dans le cerveau associés à des demandes cognitives), les Potentiels Évoqués (changement du rythme cardiaque en réponse à un stimulus); et enfin l'étude de l'imagerie cérébrale (Imagerie à Résonance Magnétique Fonctionnelle IRMF). Ces indices physiologiques sont utiles car ils sont aussi des indicateurs de la charge cognitive durant l'exécution de la tâche mais sont aussi assujettis à des contraintes, telles que leurs caractère intrusif (électrodes, conditions de confinement, matériel non transportables, etc.) et leur coût dans le cas de l'IRMF.

Une autre méthode quantitative consiste à utiliser des techniques de tâches primaire (TP) ou secondaire (TS) (Wickens et Holland, 2000; Cantin, 2009). On les désigne aussi par le terme de mesures comportementales ou basées sur la performance. Les mesures de TP consistent à évaluer la performance lors de l'exécution d'une TP comme par exemple le temps de réponse pour l'exécuter. Mais ce sont les études de TS qui sont les plus citées. Partant de la prémisse que les ressources cognitives sont dans l'ensemble limitées, le principe de base de la technique de la TS est que les ressources affectées à cette tâche secondaire sont dépendantes de la quantité de ressources affectées à la tâche principale. Les ressources cognitives qui ne sont pas utilisées pour réaliser la TP, le sont pour la TS. La performance pour réaliser la TS peut alors servir d'indicateur de mesure de la charge cognitive pour la TP. Pour que cette mesure soit opérationnelle, la TS ne doit pas interférer au niveau structural avec la TP (par exemple, production temporelle manuelle tout en

conduisant) et les individus doivent être bien avertis de la nécessité de se concentrer sur leur TP.

3.2.1.3 L'oculométrie comme mesure de la charge cognitive

Avant d'aborder l'application de cette technique de mesure du mouvement des yeux dans divers domaines et de présenter ses métriques, abordons brièvement son historique en fonction du matériel utilisé, l'oculomètre (« eye-tracker »). Après les premières recherches sur l'observation directe des mouvements dès la fin du 19ème siècle (Dodge & Cline 1901), l'intérêt pour le mouvement des yeux a redoublé avec l'avènement des sciences cognitives, notamment, avec l'étude de référence de Yarbus (1967). Ce chercheur russe présente à des sujets un tableau de Repin, et leur demande d'explorer librement le tableau. Par la suite, il leur pose des questions sur le tableau (cf, figure 13). Ses résultats montrent que, lors de cette tâche d'inspection visuelle, les zones fixées par mouvement des yeux sont influencées par la question posée, démontrant ainsi le rôle du mouvement des yeux comme un reflet externe de processus cognitifs.

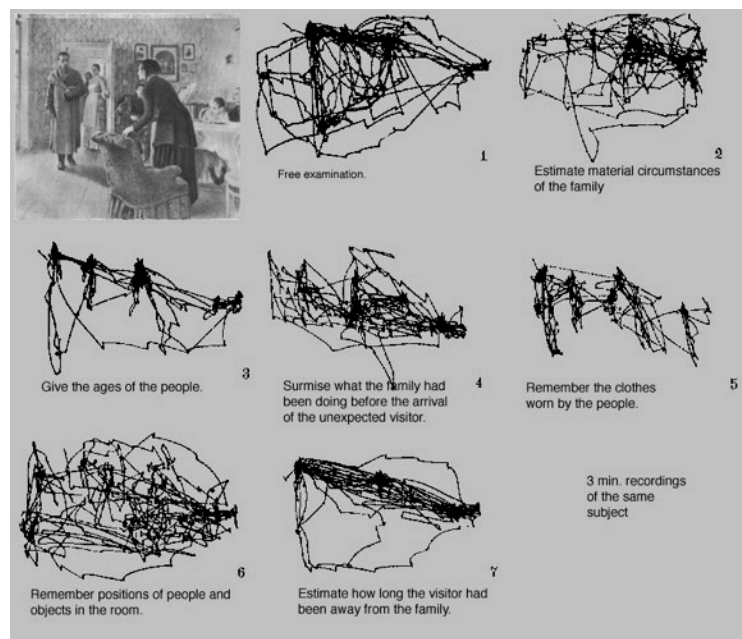


Figure 13 : L'expérimentation de Yarbus (1967)

Avec l'évolution des systèmes informatiques, de nouveaux systèmes portatifs et moins intrusifs sont développés. Deux catégories d'oculomètres sont actuellement utilisées, selon la tâche à évaluer. Ces deux systèmes se basent sur l'enregistrement du mouvement des yeux par le reflet de la cornée : « *Le principe consiste à envoyer au centre de la pupille une lumière infrarouge émise par une diode ou un ensemble de diodes. Le reflet infrarouge renvoyé par la cornée de l'œil est ensuite détecté et ce sont les variations d'intensité de ce reflet qui permettent, après calcul, de repérer le centre de la pupille et de connaître la position de l'œil* » (Baccino et Colombi, 2000, p.7). Les premiers systèmes à distance (« remote eye-tracker ») sont placés généralement en face du sujet qui doit réaliser sa tâche, sur un ordinateur par exemple, si la tâche consiste à explorer un site web. Le principal inconvénient de ce genre de système est la rigidité qu'il impose au sujet, ce dernier doit bouger minimalement pour ne pas fausser les mesures. Les seconds systèmes, les oculomètres à casques ou à lunettes (« head mounted eye tracker »), sont constitués d'un casque (ou lunettes) sur lequel sont placés un ou des petits miroirs en dessous des yeux, ainsi que de caméras mesurant le reflet émis par ces miroirs et enregistrant la scène. L'avantage de ces systèmes est leur caractère portatif qui permet le mouvement naturel des sujets. Leur principal inconvénient est « d'être sensible aux variations lumineuses de l'environnement ainsi qu'aux vibrations et tressautements » (Couronné, 2007). Dans le cadre de cette recherche, c'est ce second système qui a été utilisé.

Avec ces différents oculomètres sur le marché, qui sont de plus en plus abordables, légers et performants, plusieurs métriques ont été développées pour quantifier et analyser le mouvement des yeux. Dans une série de travaux, Goldberg et al. (1995, 1998) ont identifié un ensemble de métriques oculaires sur l'utilisabilité du Web mais qui ont été repris dans divers domaines. Ces métriques permettent d'analyser deux sortes de processus cognitifs : la recherche d'information et le traitement cognitif de l'information. L'imagerie mentale se place dans cette seconde catégorie. Ainsi, le nombre de fixation et la durée des fixations sont les deux indicateurs associés à cette catégorie de traitement cognitif. Pour comprendre les fixations, il faut commencer par définir les saccades. Une saccade consiste en un déplacement soudain et rapide des yeux. En moyenne, un individu effectue plus de 150 000 mouvements saccadiques des yeux par jours (Couronné, 2007). La durée d'une saccade

varie entre 30 et 120ms. Les périodes qui séparent deux saccades sont appelées les fixations, et durent généralement entre 200 et 600ms. Certaines recherches sur l'imagerie font aussi appel au concept de trajet ou « scanpath », qui est constitué de plusieurs séquences de saccades et fixations. D'autres mesures comme le taux de clignement et la dilatation de la pupille sont utilisées comme indicateur de la charge cognitive (Poole et al., 2004). La pupillométrie ou la dilatation du diamètre de la pupille a été plus étudiée au cours des trente dernières années et dans différents domaines (linguistique, marketing, interfaces Homme-Machine, etc.). Comme le rappelle Cantin (2009, p.16) : « Une augmentation de la charge cognitive devrait amener une dilatation de la pupille. »

3.2.1.4 Combinaison des mesures de la charge cognitive

Les mesures exposées ci-dessus présentent des niveaux variés de précision et de complexité de mise en œuvre. Leur pertinence dépend de la tâche à évaluer. Plusieurs auteurs (Eggemeier, 1988; Wickens & Holland, 2000; Cegarra & Chevalier, 2008) ont identifié sept critères pour évaluer la qualité de ces mesures :

- La validité pour s'assurer qu'il s'agit bien de la charge qui est mesurée.
- La fidélité pour s'assurer que l'on obtient les mêmes mesures si l'expérience est répétée dans les mêmes conditions.
- La sensibilité indique que la technique de mesure est capable de détecter les changements de niveaux de la charge durant la tâche.
- La diagnosticité permet de préciser la source la charge durant la tâche (ex : effort physique, la performance, etc.).
- La sélectivité (une sous-catégorie de la diagnosticité) indique que la mesure de la charge cognitive reste inchangée lorsque la charge de la tâche ne change pas.
- Le caractère intrusif des mesures qui peuvent perturber la performance de l'individu.
- La mise en œuvre et l'administration de la mesure de la charge.

Selon les techniques de mesure de la charge cognitive, ces critères sont satisfaits ou non. Ainsi par exemple, le NASATLX a une bonne validité, fidélité, sensibilité et surtout une bonne diagnosticité à cause de ses six paramètres qui permettent de détecter la source de la charge cognitive (Cegarra & Chevalier, 2008). La méthode basée sur la réalisation d'une tâche secondaire, si elle est bien conçue et réalisée expérimentalement, présente une forte sensibilité mais une diagnosticité faible. Enfin, la pupillométrie présente une grande validité, et sensibilité. Elle est de moins en moins intrusive mais sa mise en œuvre est plus complexe expérimentalement et sa sélectivité est faible puisque des facteurs externes peuvent influencer la mesure tels que l'ambiance lumineuse ou les réactions émotionnelles (Partala & Surraka, 2003).

Ces constats amènent certains auteurs à suggérer que l'utilisation conjointe de certaines de ces mesures est susceptible de permettre une mesure satisfaisante de la charge cognitive. Des relations entre les mesures qualitatives et physiologiques ont été montrées dans plusieurs travaux (Cegarra, 2008; Miyake, 2001; Miyake et al., 2007). Ainsi, Cegarra et Chevalier (2008) ont utilisé leur application Tholos, qui intègre à la fois deux mesures quantitatives (TS et pupillométrie) et une mesure qualitative (NASATLX), lors d'une tâche de résolution de puzzles de type sudoku. Les participants devaient résoudre deux puzzles, un premier facile et un second plus complexe. Les résultats qu'ils ont obtenus indiquent que le NASATLX a amélioré la compréhension de la cause de la charge cognitive selon le niveau de complexité des puzzles alors que la TS a permis de comparer les charges cognitives dans les deux situations.

Pour résumer, ces différentes techniques de mesure de la charge cognitive ont leur spécificité et doivent être utilisées selon l'objectif de l'expérimentation. Si l'on a besoin d'une mesure globale de la charge cognitive, une TS peut être satisfaisante. Si l'on a besoin d'analyser la cause de la charge cognitive, le NASATLX peut être utile. Enfin, l'usage de la pupillométrie comme mesure de la charge cognitive présente un intérêt certain pour sa validité et sa sensibilité à déterminer la variation de l'activité cognitive des concepteurs durant la réalisation de leur tâche. Dans le cadre de cette recherche, trois métriques sont utilisées : La TS, le NASATLX et la pupillométrie; le tableau 2 résume les forces (+) et

faiblesses (-) des mesure choisies. Une combinaison de ces trois mesures devrait permettre une bonne indication de la charge cognitive.

Tableau 2 : Forces et faiblesses des mesures de la charge cognitive choisies

	Tache secondaire (TS)	NASATLX	Pupillométrie
Validité	+	+	+
Fidélité	+	+	-
Sensibilité	+	-	+
Diagnosticité	-	+	-
Sélectivité	+	-	-
Intrusion	-	+	-
Mise en oeuvre	-	+	-

Dans le processus de conception architecturale, la mesure de la charge cognitive est fortement liée à celle de l'imagerie mentale puisque ces deux processus sont interreliées.

3.2.2 L'imagerie mentale et sa mesure

Les études dans le domaine de la conception cognitive témoignent d'un intérêt croissant pour comprendre comment les architectes conçoivent et développent leurs idées et images mentales. Les difficultés majeures dans l'étude de l'imagerie sont l'accès aux fonctions et propriétés de l'imagerie mentale et des opérations cognitives (Finke, 1990) et l'accès aux processus de la pensée. Étudier l'imagerie dans un contexte dynamique lors de la conception architecturale, est relativement complexe au niveau de l'opérationnalisation. En effet, comment accéder au contenu et au processus de l'imagerie mentale?

3.2.2.1 Les mesures qualitatives de l'imagerie mentale

Dans le domaine de la conception, les recherches menées sont souvent de nature qualitative. Les chercheurs s'appuyent alors sur les entretiens (Lebahar, 2007, Lawson, 2005), la verbalisation ou encore par l'analyse des actions effectuées par les individus

pendant la conception (Goel, 1995; Suwa & Tverski, 1997, Gero, 1998, Bilda & Demirkan, 2003, Bilda & Gero, 2008, Tang & al., 2011).

L'analyse de protocole verbaux ou des actions des individus qui réalisent des esquisses ou communiquent entre eux, est devenue la technique expérimentale qui prévaut pour explorer la pensée des concepteurs et leur capacité d'idéation. Newell (1968) fut le premier à l'utiliser dans l'étude des systèmes du traitement de l'information. Pour tenter de comprendre "comment les concepteurs conçoivent", les chercheurs ont utilisé l'introspection avant d'adopter l'analyse de protocoles verbaux (Newell et Simon, 1972). Akin (1986) a adopté cette technique en se concentrant sur les informations extraites à partir du contenu et non seulement sur la verbalisation des sujets. Schön (1987) a opté pour une approche semblable afin d'illustrer son concept de "réflexion par action". L'analyse de protocoles, verbaux ou des actions des participants, implique la segmentation, le codage et l'analyse des verbalisations et des actions physiques des concepteurs durant la conception. Des données audio et vidéo sont recueillies durant les expériences. Les verbalisations sont généralement transcrites et synchronisées aux images filmées. Dorst et Dijkhuis (1995) ont classé ces techniques dans deux catégories : l'analyse de protocole simultané et rétrospectif. Dans les protocoles simultanés (« concurrent protocol »), les sujets expriment à voix haute leurs pensées et actions pendant qu'ils conçoivent (« think aloud method »); alors que dans un protocole rétrospectif, les participants conçoivent, puis de manière post-expérimentale, expliquent leurs actions et pensées, avec ou sans l'aide des enregistrements vidéo de la session de design. Durant les expérimentations à caractère simultané, les participants sont priés de ne pas rationaliser ou justifier leurs décisions, mais de rapporter directement leurs actions réelles (ou stratégies et objectifs) lorsqu'ils essaient de résoudre les problèmes, révélant ainsi des détails sur l'information utilisée dans leur mémoire à court terme. Certains chercheurs jugent que la verbalisation à voix haute n'altère pas les processus cognitifs du concepteur jusqu'à un certain point (Ericsson et Simon, 1993) alors que d'autres chercheurs pensent qu'il y a une influence de la subjectivité du concepteur qui extériorise sa pensée (Akin, 1986). Récemment, certains chercheurs ont commencé à prioriser les protocoles rétrospectifs afin d'éviter les dangers de la subjectivité des protocoles simultanés et de se concentrer sur les aspects cognitifs du contenu. On parle

alors de processus orienté-contenu (« content-oriented process ») puisqu'il s'agit de comprendre « what designers see, attend to, think of and retrieve from memory while designing » (Suwa et al., p.231).

La technique rétrospective permet aux sujets de rappeler les processus cognitifs précédemment utilisés et la recherche des informations stockées principalement en mémoire à long terme et, en partie, en mémoire à court terme. L'utilisation des enregistrements vidéo de la session de conception est aujourd'hui de plus en plus employée pour aider les participants à se rappeler de leurs processus de pensée (Suwa & Tversky, 1997; Gero & Mc Neill, 1998).

Lors des différentes étapes de l'analyse de protocole, deux éléments sont primordiaux, la segmentation et le schéma de codage. Ils permettent de soutenir et d'étayer les hypothèses et les postulats de recherche (Bilda, 2006). Après la collecte des données brutes, celles-ci sont divisées en petites unités appelées "segments". Le but de la segmentation est de faciliter l'analyse des données. Dans les récentes recherches (Gero et Mc Neill, 1998; Suwa, Purcell et Gero, 1998), le protocole est segmenté en fonction de l'intention et des actions du concepteur, qui sont interprétées pour chaque segment et où chaque segment présente une seule intention du concepteur durant le processus de conception. Suwa et al. (1998) ainsi que Kavakli et Gero (2001) ont identifié plusieurs type "d'actions" : les actions physiques référant au dessin et à l'observation, les actions perceptuelles réfèrent à l'interprétation de l'information visuelle, les actions fonctionnelles qui permettent de donner des significations aux choses, et des actions conceptuelles qui réfèrent à la planification des actions et à la prise de décisions.

Malgré l'usage fréquent de cette approche expérimentale, on peut citer quelques faiblesses liées à l'utilisation de l'analyse de protocoles. Akin (1986) les résume ainsi : (1) Puisque les participants verbalisent leurs comportements (protocoles simultanés), l'introspection et à la subjectivité sont de mises. (2) La charge de travail requise pour l'analyse et l'interprétation des données, impose un nombre réduit de participants pour chaque expérience, ce qui réduit la généralisation des résultats obtenus. (3) Le processus de pensée peut être beaucoup plus rapide que le geste/action du sujet, cette pensée ne peut donc être pleinement reflétée. (4) Il

y a généralement des lacunes ou des périodes de silence que l'on retrouve dans la plupart des protocoles, ce qui ne correspond pas nécessairement à une absence d'activité cognitive. Cependant, l'utilisation de cette méthodologie a abouti à des résultats forts intéressants dans le domaine des études cognitives de la conception, ce qui justifie son usage fréquent dans les différentes recherches citées.

La linkographie, développée par Gabriela Goldschmidt (1991), est une autre méthode qualitative pour mesurer la productivité lors de la conception architecturale. Pour cette auteure, la linkographie est l'étude des liens (« links ») entre les idées qui sont produites au fil du processus de conception, basée sur la notion de flux créatif (« flow ») décrit par Csikszentimihalyi (1996). À partir de la verbalisation des concepteurs, durant le processus, le ou les expérimentateurs experts relèvent les liens entre les idées (« design moves ») en se basant sur leurs connaissances dans le domaine. Goldschmidt (1995, p.195) définit les design moves comme « a step, an act, an operation, which transforms the design situation relative to the state in which it was prior to that move ». Le nombre et la densité de liens entre idées sont de bons indicateurs de la qualité du processus créatif (fig. 14). Plusieurs auteurs dans le domaine des études cognitives en conception ont utilisé la linkographie pour analyser la quantité et la qualité des idées générées pendant un processus de conception (Kan & Gero, 2007; Cai & Do, 2007, Bilda & Gero, 2008). Malheureusement, comme pour l'analyse des protocoles, la linkographie est une méthode très coûteuse en termes d'effort et de temps pour l'analyse des données.

Dans l'expérience de Bilda et Gero (2008), il s'agissait de comparer les idées de six concepteurs qui devaient réaliser leur projet dans deux conditions : en ayant les yeux bandés (utilisant leur imagerie mentale seulement) ou alors en réalisant des esquisses. Les résultats obtenus montrent que la productivité des idées est aussi bonne dans les deux conditions, contrairement à ce que l'on aurait pu penser de l'usage de l'esquisse comme favorisant la génération des idées.

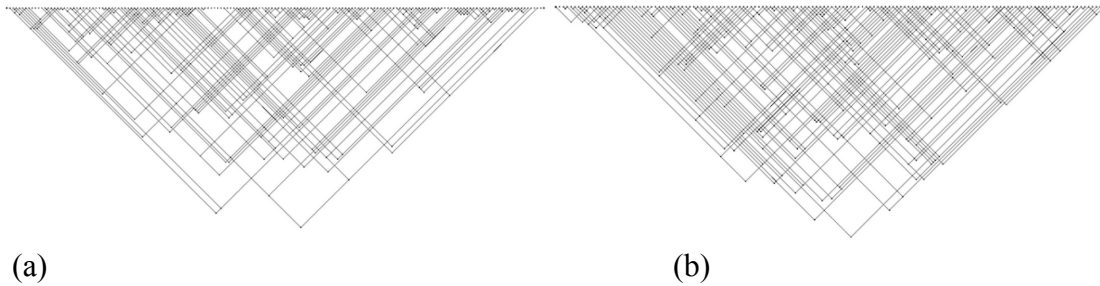


Figure 14 : Exemple de graphes d'idées générés par un participant (architecte expert) ayant les yeux bandés (a) et esquissant normalement (b) (Bilda & Gero, 2008)

3.2.2.2 Les mesures quantitatives de l'imagerie mentale

Contrairement aux méthodes qualitatives décrites ci-dessus et qui se basent essentiellement sur des techniques d'introspection, ou sur des techniques reposant sur la subjectivité de l'expérimentateur ou autres évaluateurs, les techniques mises au point en psychologie cognitive essaient de contrôler de manière précise la tâche à réaliser par le sujet. Une des techniques les plus utilisées en psychologie expérimentale est la chronométrie mentale, soit l'étude du temps de réponse requis pour accomplir une tâche, qui est « considéré comme une expression mesurable et objective des temps de traitement interne » (Silva Neves, 1999). Une autre technique utilisée est l'imagerie cérébrale.

En psychologie expérimentale, des études ont été menées en laboratoire (par Kosslyn notamment) au cours des trente dernières années. Ces études portaient sur des tâches d'imagerie précises (rappel sériel, manipulation de formes géométriques, etc.) qui n'impliquaient pas d'autres processus cognitifs. Les expériences menées par Finke (1992) pour évaluer l'usage de l'imagerie mentale dans des activités créatives sont aussi de type expérimental (en laboratoire). Finke (1992) a réalisé plusieurs expériences pour mesurer ce qu'il appelle la synthèse mentale (« mental synthesis »), soit les transformations des images mentales. Dans ses exercices, il fournissait à des participants trois formes 3D (ou 2D dans une autre expérience) et leur demandait dans un premier temps de fermer les yeux durant deux minutes et de créer des objets fonctionnels en combinant les trois formes puis de les décrire et les représenter. Dans un second temps, il fournissait d'autres formes 3D aux participants mais cette fois en leur demandant de dessiner les objets. Un jury devait par la

suite évaluer la créativité des formes obtenues. Il s'est avéré que les objets créés dans les deux situations n'ont pas été jugés plus créatifs les uns que les autres. Cette expérience a inspiré Anderson et Heslrup (1993) qui ont trouvé que les participants avaient tendance à créer plus d'objets physiques mais que ces objets n'étaient pas plus créatifs. Kokotovich et Purcell (2000) ont eux aussi comparé les performances de designers versus des non-designers (étudiants universitaires en droit). Il s'est avéré que les solutions des designers étaient plus créatives.

Cependant des études en oculométrie, semblent indiquer qu'il y a un lien entre les mouvements des yeux et l'imagerie mentale (Laeng & Teodorescu, 2002; Mast & Kosslyn, 2002 ; Johansson et al, 2005 ; Johansson et al, 2006), et des travaux utilisant cette technique ont été effectuées dans un contexte dynamique.

Comme le rappelle Richardson (2004), très tôt les chercheurs ont souligné que la fréquence des mouvements des yeux augmentaient durant l'imagerie mentale (Clark, 1916 ; Stoy, 1930, Goldthwait, 1933). Par la suite, plusieurs chercheurs ont mis en évidence le rôle fonctionnel du mouvement oculaire pour l'imagerie mentale (Laeng & Teodorescu, 2002 ; Mast & Kosslyn, 2002 ; Johansson et al, 2006, Humphrey et Underwood, 2008). Ainsi, le mouvement des yeux est considéré comme étant un témoin de l'activité mentale des individus. Pour Couronné (2007), le mouvement des yeux agit comme « un pointeur comportemental de l'activité cognitive ». Il cite en exemple les travaux de Stern (1993) sur l'orientation de la pensée visuelle, ou le chercheur demande à un sujet d'épeler le mot « mother » à l'envers. Les résultats montrent que les yeux se déplacent de droite à gauche, comme si les sujets visualisaient le mot. Le regard serait donc asservi à l'activité cognitive en tant que pointeur comportemental. Les études de Norton et Stark (1971), qui comparent les trajets du regard (scanpath¹²) de participants lors de deux tâches de mémorisation d'une image puis de reconnaissance (phase d'imagerie mentale) de cette même image, montrent que les trajets seraient similaires pour un même participant entre les deux phases. Dans la même veine de recherches, Brandt et Stark (1997) exposent à neuf participants des figures aux motifs irréguliers dans une double tâche de mémorisation et de reconnaissance de

¹² Les trajets ou scanpath, sont constitués de fixations et de saccades. Tous ces termes seront définis ci-dessous (donner la section).

figures. Leurs résultats confirment que « eye movements during imagery are not random, but reflect the content of visualized scene » puisque que les mouvements oculaires qui se produisent pendant la remémorisation reflètent de manière précise les relations spatiales de l'image originale. En utilisant toujours la même technique de mémorisation et de reconnaissance, une étude de Laeng et Teodorescu (2002) soutient que les mouvements oculaires durant l'imagerie mentale ne reflètent pas seulement les images mentales, mais aident également à la génération de ces images mentales. Dans une première expérience, lors de la tâche de mémorisation, ils ont demandé à un groupe de sujets de fixer le centre d'une image (matrice avec carrés noirs et blancs), alors qu'un second groupe de sujets pouvait explorer sans consignes cette image. Lors de la phase de reconnaissance (formation des images mentales), tous les sujets pouvaient bouger leur regard librement. Lors d'une seconde expérience, ils demandèrent à un troisième groupe de sujet de fixer leurs regards sur le centre de l'image lors de la seconde phase de reconnaissance (imagerie mentale). Leurs résultats des trajets montrent que les sujets qui explorent l'image librement durant les phases de perception et de remémoration ont produit les mêmes patterns de mouvement des yeux aux deux phases. Par contre les sujets, qui fixent le centre pendant la phase de perception adoptent spontanément la même position de regard pendant la remémoration. Quant aux sujets qui explorent librement durant la perception, mais doivent fixer le centre de l'image durant la remémoration, les chercheurs ont trouvé que leur capacité à décrire la scène semble diminuer. Les mouvements oculaires ont un rôle d'index spatial permettant de décoder les données mnésiques et jouent donc un rôle fonctionnel dans la génération des images mentales visuelles (Mast et Kosslyn, 2002). Ces différentes recherches soulignent le lien entre imagerie mentale et mouvement des yeux, mais il est nécessaire de rappeler que ces expériences ont été menées en laboratoire, dans des conditions expérimentales précises, où le temps entre les phases de mémorisation et de reconnaissance n'excédait pas les 40 secondes, et que les images soumis aux sujets étaient relativement simples. Concernant le temps entre les phases de perception et de reconnaissance, Ishai et Sagi (1995) ont montré que lors de la tâche de reconnaissance, les mouvements oculaires des sujets étaient similaires jusqu'à cinq minutes après la tâche de perception. Concernant la complexité des scènes, Johansson et al. (2006) ont reconduit ces mêmes expériences avec des images plus

complexes (plus de détails, et des images plus grandes). Leurs résultats confirment les résultats précédents.

Pour Humphrey et Underwood (2008), ces différentes conclusions soutiennent l'approche de Kosslyn sur la formation des images mentales dans le « visual buffer » de la mémoire de travail (Kosslyn, 2006). Pour ce dernier, la génération d'image mentale est réalisée de manière séquentielle dans la mémoire de travail, et les représentations de ces images sont stockées dans la mémoire à long terme. Comme pour Hebb (1968), Humphrey et Underwood (2008) pensent que les mouvements oculaires seraient nécessaires à la collecte et l'organisation des portions d'images stockées en mémoire, afin de reconstituer une visualisation globale d'une scène et soutiennent que « when a scene stored in long term Memory is visualized, it is generated (or rather created ou re-created) in the working memory and in the visual buffer » (Humphrey & Underwood, 2008, p.3). Les résultats mentionnés suggèrent que le mouvement oculaire représente un outil important dans le processus d'imagerie mentale et « that they might be necessary for the construction and utilization of visual imagery » (Brandt et Stark, 1997, p.29).

Une autre méthode d'analyse de la structure fractale des scanpath pourraient servir d'indicateur de l'imagerie mentale des concepteurs (Côté et al., 2011; cf. annexe 9). L'utilisation des fractales pour analyser le mouvement des yeux a déjà été l'objet de recherche (Masayushi et al., 2007; Renaud et al., 2007) mais pas dans le domaine de la conception. Cette avenue sera développée et analysée dans le cadre du programme de recherche dans lequel s'inscrit la présente recherche.

À notre connaissance, aucune recherche en conception architecturale n'a utilisée l'oculométrie pour évaluer l'idéation et les processus cognitifs qui y sont impliqués. D'ailleurs, l'oculométrie est surtout utilisée dans des tâches d'évaluation des produits de conception plutôt qu'un outil de mesure des processus cognitifs. Par exemple, Hammer et Langyel (1991) ont étudié les mouvements oculaires sur des objets de consommation; Baccino et Colombi (2001) l'utilisabilité des site-web ; Koivunen et al. (2004) ont étudié la manière dont les participants évaluent le design de téléphones mobiles et Courroné (2007) a évalué les systèmes d'assistance à la conduite chez le constructeur automobile Peugeot.

Pour résumer, la littérature sur l'oculométrie indique qu'il existe un lien entre le mouvement des yeux et l'imagerie mentale et que le mouvement des yeux joue un rôle fonctionnel dans le processus cognitif impliquant la formation d'images mentales. Tout en rappelant le caractère exploratoire de cette recherche et en nous basant sur les résultats des travaux de Brandt et Stark (1997), Laeng et Teodorescu (2002) et Johansson et al. (2006), nous postulons que les indicateurs oculométriques, tels que le nombre et la durée de fixations ainsi que la pupillométrie, utilisés pour mesurer la charge cognitive peuvent inférer sur l'imagerie mentale, étant donné que cette dernière est le principal processus cognitif impliqué lors de l'idéation. En d'autres termes, si la charge cognitive d'un concepteur est élevée lors de la tâche d'idéation, cela signifie qu'il utilise davantage son imagerie mentale.

Pour résumer, à notre connaissance, aucune étude dans le domaine de la conception architecturale n'a été réalisée avec des méthodes quantitatives pour évaluer les deux notions identifiées dans notre modèle théorique, c'est-à-dire l'imagerie mentale et la charge cognitive. De nombreux auteurs tels que Suwa et Tverski (1997), Kavakli et Gero (2001), Akin (1986), Goel (1995), Lebahar (2007) et Bilda et Gero (2007, 2008) ont étudié l'imagerie mentale et la charge cognitive de manière qualitative via les entretiens, l'analyse de protocoles et la linkographie. Dans le cadre de cette thèse, l'apport majeur concerne l'adaptation de techniques mixtes quantatives et quantitatives empruntées à la psychologie cognitive expérimentale dans un contexte dynamique et complexe de l'idéation architecturale. Ainsi dans un souci de validité écologique et d'évaluation de l'imagerie mentale et de la charge cognitive de manière *in vivo*, nos recherches se déroulent dans un cadre académique « traditionnel » qui sera décrit dans le chapitre 4.

3.3 Évaluation des artéfacts (Products)

Évaluer¹³ des productions créatives est très complexe car essentiellement basé sur la subjectivité des évaluateurs. Howard et al. (2008) qui ont recensé les mesures de la

¹³ Dans cette section, l'évaluation concerne les solutions finales, pour fin de communication aux pairs ou au client. Il ne s'agit donc pas d'évaluation de représentations que le concepteur utilise pour développer ses idées.

créativité dans une dizaine de recherches, se sont aperçus que généralement, sont mises en avant deux caractéristiques clé de la créativité, soit la nouveauté et l'adaptabilité, même si la sémantique change d'un auteur à l'autre. Si l'on suit la définition de la créativité, il semble plus simple d'évaluer l'aspect adapté ou fonctionnel des produits en établissant des critères objectifs (respect des contraintes prescrites : par exemple nombres et superficies de pièces, respect des normes d'urbanisme ou d'accessibilité universelle, etc.). Mais lorsqu'il est question de l'aspect novateur ou original, la subjectivité des évaluateurs entre en ligne de compte.

Dans le domaine de la conception et plus spécifiquement de l'architecture, les travaux qui ont traité de l'évaluation des solutions architecturales dans un cadre académique ou professionnel l'ont toujours fait en utilisant la méthode qualitative qui repose sur l'évaluation par des experts dans le domaine (enseignants ou professionnels) (Bilda et Gero, 2006, Casakin, 2008, Yukhina, 2008). Amabile (1983) a théorisé et documenté empiriquement au cours des trente dernières années cette méthode, appliquée dans le domaine de la créativité, qu'elle a nommé « Technique d'Évaluation Consensuelle » (TEC). La TEC est basée sur l'idée que la meilleure mesure de la créativité d'une œuvre, d'une théorie, ou de tout artéfact est la combinaison des évaluations des experts dans ce domaine. Dans son ouvrage « Creativity in context » (1996), Teresa Amabile recense une trentaine d'études menées dans son laboratoire et concernant des tâches artistiques (peinture, travaux artistiques d'étudiants, arts visuels), des tâches verbales (histoires racontées à voix haute, poésie) et des tâches de résolution de problèmes (programmation informatique, solutions d'affaires, idéation pour produits Hi-Tech). Amabile suggère qu'un individu non-expert peut évaluer les productions créatives du moment qu'il suit une légère formation dans le domaine ; mais bien entendu cela dépend du domaine ainsi que de la nature et de la complexité de la tâche.

Ainsi dans plusieurs expériences portant sur l'évaluation des travaux artistiques réalisés par des élèves du primaire, il existait une forte corrélation entre les évaluations effectuées par des experts du domaine (artistes) et celles réalisées par des psychologues. Dans une autre expérience consistant à évaluer les poèmes écrits par des élèves du primaire (Picarriello, 1994), les résultats montrent que les évaluations des étudiants gradués en psychologie sont

corrélées avec les évaluations des instituteurs du primaire. Dans un souci de simplifier la procédure d'évaluation, puisqu'il est parfois difficile de trouver des juges experts dans un domaine, Amabile ouvre la porte de l'auto-évaluation comme moyen fiable de juger les productions artistiques. Elle montre que des résultats d'auto-évaluation présentent une corrélation moyenne (.30 -.40) par rapport aux évaluations des juges experts, ce qui représente une corrélation faible à moyenne. Mais cette avenue n'a pas été explorée davantage dans la littérature.

Pour Hennessey (2003), une collaboratrice de Amabile, les chercheurs qui décident d'utiliser cette technique doivent respecter quatre critères :

1. Les juges doivent avoir une expertise dans le domaine même si le niveau d'expérience des juges n'est pas équivalent. Tel que mentionné ci-dessus, les juges doivent avoir une connaissance minimale du domaine.
2. Les juges doivent évaluer les productions ou artefacts de manière indépendante sans être influencés par l'expérimentateur.
3. Les juges doivent évaluer les projets en les comparant entre eux et non selon une norme ou dans l'absolu.
4. Chaque juge doit évaluer les artefacts dans un ordre aléatoire pour éviter l'effet d'ordre.

Le principal avantage de la TEC est qu'elle ne repose sur aucune théorie de la créativité et par conséquent, sa validité qui a été établie empiriquement n'est dépendante de la validité d'aucune théorie de la créativité (Baer et al. 2004). Les critères d'évaluation ne sont donc pas les mêmes dépendamment des experts et du domaine. Dans le domaine du design industriel (Wojtczuk et Bonnardel, 2011) ont demandé à un jury de 20 experts d'évaluer les productions (souris d'ordinateurs) selon les critères d'esthétique, d'originalité, de fonctionnalité, et de marketing. Dans le domaine de la conception architecturale, Yukhina (2008) a remis les productions de ces participants à 3 experts, qui ont évalué la performance en fonction du nombre de contraintes prescrites (12 critères de design), ainsi que des critères d'originalité, de complexité, de flexibilité, de fonctionnalité et de qualité des

esquisses. Comme Yukhina, Casakin et Kreitler (2005) se sont basés sur le respect des contraintes prescrites, et des critères d'utilité, d'originalité et d'esthétique. D'autres métriques sont utilisées par Shah et al. (2003) et Shireen, et al (2011) comme la quantité d'alternatives générées, le respect des contraintes et le niveau de satisfaction du concepteur. Dans la présente recherche, les juges sont des architectes professionnels et des enseignants, et ils ont à évaluer les productions des participants, selon quatre critères : une évaluation globale des artefacts, leur esthétique, leur originalité et leur fonctionnalité.

Au niveau quantitatif, une seule approche quantitative d'évaluation des productions innovatrices a été identifiée. Basée sur l'oculométrie et plus précisément sur la dilatation des pupilles (Carbon et Leder, 2005 ; Courroné 2007), ces auteurs ont montré que les solutions (conception de l'intérieur d'un véhicule) jugées innovatrices requièrent plus de ressources au niveau cognitif. Pour ces auteurs, cela signifie que ces solutions sont plus intéressantes. Cette technique constitue une piste pertinente pour les recherches sur la créativité même si elle doit davantage être étayée empiriquement. Par ailleurs, sa principale faiblesse demeure son coût en terme d'efforts de réalisation, d'analyse et de matériel.

3.4 Évaluation de l'influence des media d'aide à la conception

À partir des années 1980, de plus en plus de recherches ont étudié l'utilisation de représentations visuelles dans le processus de conception architecturale et industrielle (Romer et al; 2001, Bucciarelli, 2002), ou en génie mécanique (Cohen et Hegarty, 2007). Ces études se sont surtout intéressées aux esquisses comme outil d'extériorisation de la pensée du concepteur et des images mentales générées. Ces travaux ont surtout reposé sur des méthodes qualitatives tel que des questionnaires (Romer et al., 2001), des études ethnographiques (Bucciarelli, 2002), l'observation (Lebahar, 2003, 2007) et l'étude expérimentale en laboratoire d'exercice de résolution de problèmes (Thomas et Carroll, 1979). L'application de ces méthodes a cependant été très limitée, ce sont surtout les analyses de protocoles à partir du milieu des années 1990 qui dominent les travaux sur l'évaluation des media de conception. Même si l'analyse de protocoles est « la » méthode principalement utilisée dans le domaine de la conception, la présente recherche ne fait que l'aborder et l'expliquer; mais ne se basera pas sur elle. En effet, cette méthode est coûteuse

en terme d'efforts car elle nécessite de nombreuses ressources pour l'analyse des données générées. Les principales études citées ci-dessous reposent généralement sur un nombre faible de participants (moins de dix en général).

Pour Akin et Lin, (1995, p.212), « the visual-graphic data should be a method of analysing design, since drawings play a key role in design ». Ullman et al. (1990) considèrent les images mentales comme des « morceaux cognitifs » (“chunks”) qui sont extériorisés via des mots, des esquisses ou des gestes lors de la conception. Ainsi, l'étude des esquisses pourrait informer comment ces morceaux cognitifs sont formés et groupés. La façon dont les concepteurs utilisent et organisent ces unités cognitives pendant la conception ont été étudiées par le biais d'analyses de protocoles (Suwa et al. 1998, Kavakli et Gero 2003, Bilda et Demirkan, 2003, Bilda, 2007).

Selon les modèles de segmentation des actions des concepteurs durant le processus, il existe plusieurs types d'actions : physiques, perceptives, fonctionnelles et conceptuelles (Suwa et al., 1998). Ces différentes catégories contiennent des sous-catégories. Les actions physiques sont divisées en trois sous-catégories : « dessiner », « modifier » et « copier ». Les actions perceptuelles sont aussi divisées en trois sous-catégories : « propriété », « relation » et « implicite ». Les propriétés désignent les attributs visuels et spatiaux des objets dépeints, comme leur forme, leur taille ou leur texture. La relation définit l'organisation spatiale et les relations entre les éléments ou les objets tel que la connectivité, l'alignement et l'éloignement des objets entre eux. Le dernier 'implicite' désigne la découverte d'un nouvel espace. Les actions fonctionnelles sont divisées en trois sous-catégories, "implémentation", "réinterprétation" et "pensée". L'implémentation fait référence à l'application de critères fonctionnels sur des formes créées lors de l'idéation et à leur réinterprétation. Quant à la dernière sous-catégorie, pensée, elle réfère aux fonctions que le concepteur attribue aux espaces lors de la conception. Enfin les actions conceptuelles regroupent deux sous-catégorie : "fixer des objectifs" et "rechercher des connaissances". Bilda (2006) a rajouté un autre niveau celui des actions visuo-spatiales qui sont basées sur les cinq opérations proposés par Kosslyn (1980) : la génération, l'inspection, le balayage et la transformation des images.

Dans le cadre des études portant sur l'influence de différents media sur la conception, plusieurs chercheurs ont utilisé la segmentation présentée ci-dessus ou une variante de cette dernière. Ainsi, l'étude de Bilda et Dermirkan (2003) a comparé l'esquisse à main levée avec une idéation dite numérique (logiciel de CAO, Design Apprentice, www.designapprentice.com). Des données empiriques sur les stratégies de conception ont été identifiées à partir des analyses de protocoles de six designers d'intérieur qui devaient réaliser un petit projet. Les résultats ont montré que les media traditionnels présentent des avantages par rapport aux media numériques en ce qui concerne la perception de propriétés visuo-spatiales et la production de solutions alternatives. Ces résultats soulignent également l'incapacité de l'outil informatique pour assister l'idéation. Ainsi, la première différence importante entre les deux types de media est que les objectifs et intentions des concepteurs ont plus fréquemment changé dans les media traditionnels. Cette conclusion est soutenue par la théorie (cf par exemple, Akin, 1986; Goel, 1995) et par le fait que les concepteurs ont l'habitude d'utiliser les esquisses comme outil de représentation tout au long de leur formation, ce qui a pu limiter leurs interactions avec l'outil numérique. De plus, les auteurs ont constaté que le nombre total d'actions cognitives était également plus élevé dans les media traditionnels, ce qui signifie que l'activité cognitive des concepteurs était plus intense lorsqu'ils dessinaient. Néanmoins comme le reconnaissent les auteurs de cet article, ces résultats ne peuvent suggérer « qu'il est moins facile de penser, voir et percevoir avec un outil numérique mais plutôt que les concepteurs utilisent des modes de raisonnement variés selon le medium ».

En utilisant l'analyse de protocoles, Tang et al. (2011) ont aussi comparé deux media de conception lors de la phase conceptuelle: l'esquisse à main levée et l'esquisse numérique sur une tablette WACOM avec le logiciel Alias Sketches Book Pro. En segmentant et en codant le processus de conception et en analysant le nombre d'actions effectuées par les participants, il s'est avéré que statistiquement, il n'y avait pas de différence significative entre les deux media. L'explication des auteurs concernant ce résultat fait référence au type de media utilisé, les deux outils pouvant permettre une manipulation similaire des données ambiguës. Une autre explication est relative aux participants novices qui correspondent aux autochtones numériques baignant depuis leur jeunesse dans cette culture du numérique et

qui ont par conséquent développé des mécanismes au niveau cognitif pour la manipulation des données numériques.

Les différents travaux consultés, dans le domaine de la conception architecturale, n'ont en revanche pas fait usage d'une méthode quantitative d'évaluation de l'incidence des media d'aide à la conception dans un contexte dynamique de design.

3.5 Résumé

Cette revue des différentes techniques de mesures des différentes composantes du modèle théorique proposé souligne la possibilité d'appliquer des mesures quantitatives et qualitatives pour évaluer l'influence des media sur le processus de conception architecturale. Ainsi dans le cadre de cette recherche, les capacités visuo-spatiales seront mesurées de manière quantitative via un test psychométrique (Tests de Elktrom et al., 1976), et la charge cognitive requise durant le processus de conception sera appréhendée au moyen de la méthode de la tâche secondaire. Cette même charge cognitive sera aussi mesurée de manière qualitative via le questionnaire du NASATLX. Par ailleurs, pour les raisons mentionnées à la section 3.2.2., les mesures de l'imagerie mentale obtenues par le biais de l'oculomètre ne seront pas traités dans le cadre de la présente thèse. Enfin, l'évaluation des artéfacts (projets produits) se fera aussi de manière qualitative via la technique d'évaluation consensuelle proposée par Amabile (1983). Cette combinaison de mesures qualitatives et quantitatives de la conception architecturale (cf figure 15), qui constitue une innovation et un apport, devrait permettre d'analyser et de documenter l'influence des media d'aide à la conception.

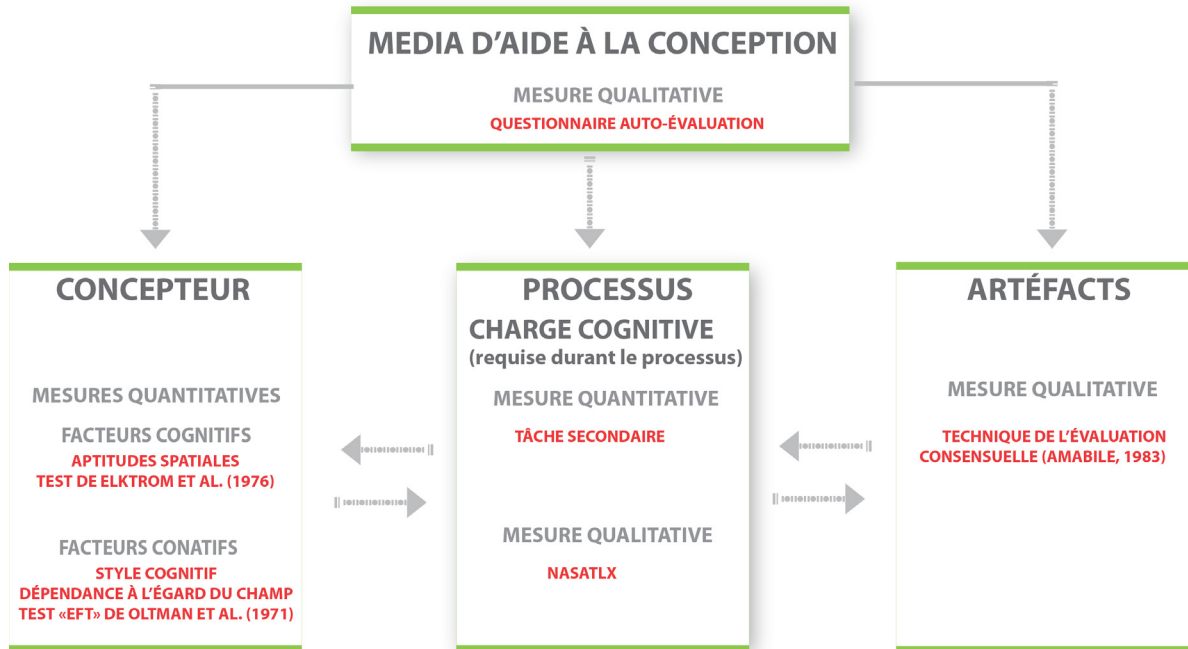


Figure 15: Opérationnalisation du modèle théorique

PARTIE II

L'EXPÉRIMENTATION

Tel que mentionné précédemment, ce projet de thèse s'inscrit dans d'un programme de recherche intitulé « Proposition d'une méthode quantitative pour évaluer l'incidence d'un medium de conception sur la tâche d'idéation », subventionné par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG). La méthodologie mixte, originale à la thèse qui est présentée au chapitre 4, décrit aussi les procédures, le matériel et l'équipement utilisés dans le cadre du programme de recherche. Cependant, la présentation des résultats (chapitre 5) et la discussion (chapitre 6) ne concernent que les questions et les données de recherches proposées et traitées dans le cadre de la présente thèse.

Par ailleurs, ce programme de recherche a reçu l'aval du comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université Laval (CERUL 2009-178A1).

Chapitre 4 : Méthodologie

L'influence du type de medium d'aide à la conception à la fois sur le processus de conception et sur les résultats de ce dernier constitue le cadre général de cette recherche. Ce chapitre débute par une présentation du choix de la méthodologie mixte adoptée, suivie par une présentation des questions de recherche ainsi qu'une description de l'expérimentation.

4.1 Proposition d'une méthodologie mixte

Tenant compte du modèle cognitif proposé et de son opérationnalisation, notre travail de thèse se situe dans un type de recherche exploratoire et descriptive, qui vise à décrire des phénomènes existants (Fortin & al., 2006) et mesurer précisément une ou plusieurs variables/caractéristiques et leurs relations. Comme le mentionne Zeisel (2006) dans son ouvrage sur les méthodologies en conception architecturale, « Inquiry by design », la première étape d'une recherche est de choisir la méthode de recherche qui répond de façon adéquate aux questions soulevées dans la littérature. Le choix de la méthode mixte s'est imposé puisque l'opérationnalisation des variables du modèle cognitif présenté au chapitre trois, indique que plusieurs mesures de ces variables sont d'ordre quantitatives (technique de la tâche secondaire, tests psychométriques pour les capacités visuo-spatiales) et qualitatives (évaluation consensuelle de la qualité des projets, questionnaire du NASATLX). Une démarche méthodologique est qualifiée de mixte lorsque le chercheur combine des données et méthodes quantitatives et qualitatives dans une même étude (Johnson et Onwuegbuzie 2004). Le choix de cette méthode mixte a donc été dicté par le pragmatisme des objectifs de la présente thèse ainsi que la possibilité de mieux comprendre le problème de recherche grâce à l'obtention de données différentes mais complémentaires (Karsenty, 2006 ; Teddlie & Tashakkori, 2009).

Les méthodes mixtes sont très utilisées dans les sciences de l'éducation, de la santé, de la psychologie, en gestion, etc., comme en témoigne la publication de plusieurs ouvrages ou revues qui traitent de cette méthode de recherche tels que le « Handbook of Mixed Methods in Social and Behavioural Research » de Tashakkori et Teddlie (2003, 2009),

« Designing and Conducting Mixed Methods Research » de Creswell et al. (2010). Par contre, l'utilisation d'une méthode mixte dans le domaine de la conception architecturale est novatrice. En effet, la plupart des recherches cognitives dans le domaine de la conception sont basées sur des études qualitatives; soit par le biais d'entretiens, d'observation, de questionnaires, l'étude de cas, ou encore par le biais d'analyses de protocoles verbaux ou des actions et gestes des concepteurs durant leur tâche de conception ou de manière rétrospective (Ericsson et Simon, 1993; Römer & al; 2001; Purcell & al., 1998; Lebahar, 1983, 2007; Yukhina, 2007; Tang & al., 2011). Waldron & Waldron (1996) ont réalisé une revue des méthodes employées pour étudier la conception :

- L'entretien consiste à poser des questions à un individu sur un sujet déterminé. Il existe plusieurs types d'entretiens : l'entretien structuré, l'entretien orienté au problème, l'entretien descriptif et l'entretien dirigé.
- L'analyse de protocoles est définie comme la description des activités dans lesquelles un sujet s'engage tout en exécutant une tâche. L'expérimentateur analyse les paroles, les gestes et actions des individus durant le processus de conception ou de manière rétrospective.
- L'étude de cas fournit une information détaillée sur le résultat d'un processus de conception. Cependant l'information sur le déroulement du processus est moins approfondie.
- L'observation du processus est issue des techniques utilisées en ethnographie, anthropologie et en sociologie. Normalement ces techniques utilisent les notes d'observation comme données de base à analyser.

Les données recueillies et les résultats de ces études sont d'ordre qualitatifs puisque basés sur la perception, la subjectivité et ou l'interprétation des concepteurs et/ou de l'expérimentateur, et ce, même si ces données qualitatives sont par la suite analysées avec des techniques statistiques quantitatives. La méthode qualitative se caractérise par une approche directe du phénomène à étudier; elle ne rejette pas pour autant les chiffres, ni les statistiques, mais ne leur accorde tout simplement pas la première place (Deslauriers,

1991). Cette approche permet des descriptions et des explications riches et fécondes qui sont solidement ancrées dans un contexte (Miles & Huberman, 2003). De plus, La méthode qualitative étudie plus en profondeur des échantillons restreints car certains comportements ou opinions même minoritaires peuvent avoir une importance pour une meilleure compréhension du phénomène étudié (Couvreur & Lehuede, 2002). Mais paradoxalement, en raison d'un faible échantillon utilisé par ces méthodes qualitatives, seules des tendances peuvent être dégagées, notamment par des statistiques non paramétriques, mais il est alors difficile de généraliser les résultats à une population. En revanche, la méthode quantitative dispose d'un fort potentiel de généralisation des résultats grâce aux échantillons plus importants, et cette méthode est « à privilégier si le but de la recherche est de décrire de façon détaillée un phénomène ou de l'expliquer en établissant des liens entre différentes variables » (Del Balso et Lewis, 2007, p.25). Or dans le cadre de la présente recherche, des liens entre les variables et données quantitatives (e.g. charge cognitive et capacités spatiales) sont aussi analysées par le biais de mesures quantitatives.

Notre posture épistémologique, c'est-à-dire l'adoption de la méthode mixte, est complémentaire aux recherches effectuées dans le domaine des études cognitives en conception. Pour Creswell et al. (2003), l'usage de la méthode mixte est motivé par la triangulation des données, c'est-à-dire « la recherche d'une convergence ou d'une corroboration des résultats sur un même phénomène étudié afin de renforcer la validité de l'étude » (Adelbert & Rouzies, 2010, p. 5). Un autre intérêt de la méthode mixte est son caractère explicatif, c'est-à-dire, que les chercheurs vont utiliser par exemple les données qualitatives (questionnaire ou entretien) pour expliquer ou valider les données quantitatives. La présente recherche est basée d'une part, sur une méthode quantitative qui permet de mesurer de manière objective certaines variables identifiées dans la cadre théorique telles que les capacités-visuo-spatiales ou la charge cognitive; et d'autre part, sur une méthode qualitative qui permet de mesurer de manière subjective la perception des participants quant à leur maîtrise des media de conception et à l'expérience qu'ils ont passée, ainsi que l'appréciation par des juges de la qualité des projets réalisés. En effet, les analyses qualitatives demeurent utiles pour caractériser par exemple la perception des participants

face à un système ou durant une tâche, car cela permet d'avancer des explications pour certains résultats et de soulever de nouvelles questions et hypothèses de recherche.

4.2 Questions de recherche

En ce qui concerne la méthodologie préconisée, notamment la mesure de la charge cognitive, la présente recherche est pionnière dans le domaine de l'architecture. Ce caractère exploratoire dû à un manque d'études appliquées à la conception architecturale incite, dans un premier temps, à poser davantage des questions de recherche plutôt qu'à formuler des hypothèses spécifiques. En effet, pour énoncer des hypothèses de recherche, il faut se baser sur une littérature consistante ou en inférer à partir d'un certain nombre de travaux effectués dans le domaine d'étude considéré ou dans des domaines connexes. Pour Guéguen (2007), si l'on formule une hypothèse, c'est que les éléments théoriques ou empiriques dont on dispose permettent de prédire certains résultats: « la recherche est cumulative et si des résultats antérieurs ont montré une orientation stable et répétée de résultats,... et bien l'on s'attend à trouver des résultats convergents » (p.38).

Ainsi, la question générale de cette thèse est la suivante:

- Existe-t-il une incidence du type de medium sur le processus de conception architecturale lors de la phase conceptuelle?

Et l'hypothèse générale est la suivante :

- L'esquisse serait le medium qui influence le plus la phase conceptuelle du processus de conception et la performance des concepteurs.

En effet, le flou, l'ambiguïté, le faible coût et la rapidité des actions et des représentations qu'il peut générer (Goel, 1995; Goldschmidt, 1995, Suwa & Tvesky, 1997; Bilda & Demirkan, 2003; Stones & Cassidy, 2007; Pour Rahimian & Ibrahim, 2008) font de l'esquisse le medium à privilégier.

Selon le modèle théorique proposé, cette question générale met en relation l'influence du type de medium d'aide à la conception sur le concepteur, le processus de conception et la

qualité des artefacts résultants. Des questions spécifiques relatives à ces trois composantes sont présentées ci-dessous.

Le concepteur

- 1.1 Existe-t-il un lien entre les capacités spatiales du concepteur et la maîtrise des media de conception ? Ou encore, l'utilisation de media de conception nécessite-t-elle de bonnes capacités spatiales?
- 1.2 Les capacités spatiales peuvent-elles influencer la charge cognitive des concepteurs selon le medium utilisé ?
- 1.3 Les capacités spatiales sont-elles corrélées aux résultats du processus de conception, et donc à la qualité des projets générés?

Le processus de conception : la charge cognitive

- 2.1 Le type de medium de conception impose-t-il une charge cognitive additionnelle au concepteur ?
- 2.2 Les capacités spatiales influencent-elles la charge cognitive?
- 2.3 La charge cognitive influence-t-elle les résultats du processus de conception et donc la qualité des projets générés?

La qualité des productions

- 3.1 Le type de medium a-t-il une incidence sur la qualité des projets générés?
- 3.2 La maîtrise d'un medium de conception a-t-elle une incidence sur la qualité des projets générés ?

La figure 16 ci-dessous représente graphiquement les liens entre les différentes questions de recherche formulées en fonction des composantes du modèle théorique proposé.

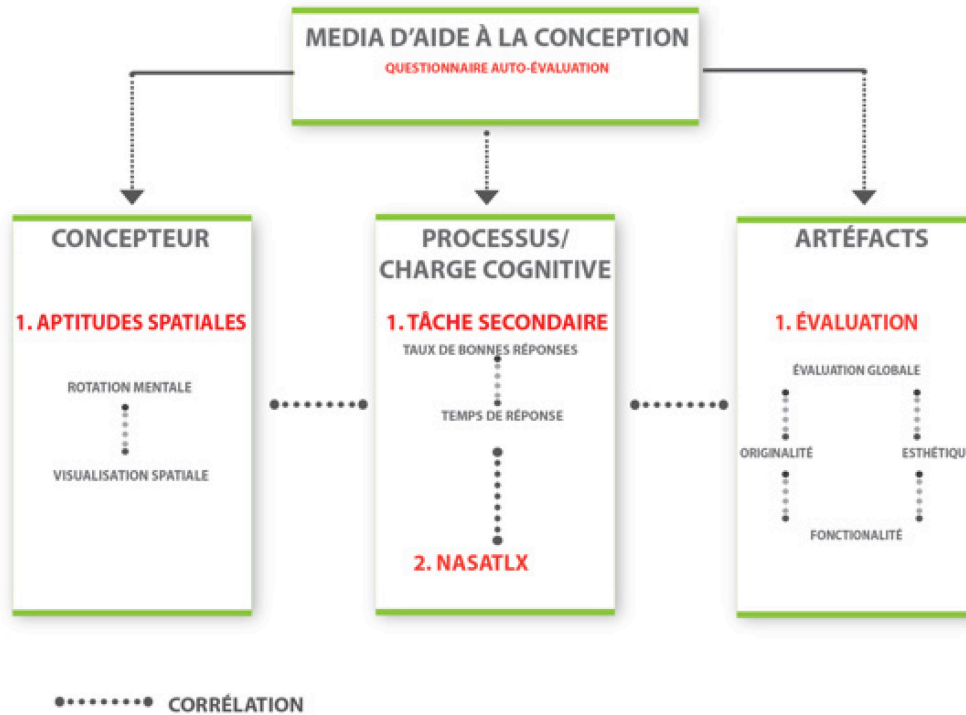


Figure 16 : Synthèse des questions de recherche

4.3 L'expérimentation

Contrairement aux recherches en psychologie expérimentale qui se déroulent généralement en laboratoire, il était crucial de tenir compte de la nature dynamique et complexe de la conception architecturale. À défaut d'analyser toutes les interactions en jeu lors des activités de conception, il faut néanmoins assurer une certaine validité écologique à l'expérimentation, en créant un environnement « traditionnel » de conception et un protocole expérimental qui soit le moins intrusif possible pour les participants qui réalisent la tâche de conception. Cette validité écologique recherchée tient compte de la complexité des interactions dans une situation de conception. Mais le but de cette recherche étant, notamment, de mesurer la charge cognitive durant le processus de conception, d'autres processus cognitifs telles que la prise de décision ou la gestion des contraintes, n'ont pas été pris en compte. L'expérience s'est déroulée dans des locaux de l'École d'architecture de l'Université Laval, où tout le matériel nécessaire était disponible.

4.3.1. Protocole expérimental

Un plan expérimental à mesures répétées a été adopté pour cette recherche. D'une part, le bassin d'étudiants disponible à l'école d'architecture étant limité, le plan à mesures répétées permet de comparer l'utilisation des trois media de conception avec un même effectif de participants ; et d'autre part, le contrôle du nombre de variables interindividuelles est plus simple à réaliser qu'avec des groupes constitués de participants différents (Dancey & Reidy, 2007). Par ailleurs, un ajustement est nécessaire pour éviter la principale faiblesse de ce plan, c'est-à-dire les effets d'ordre et de pratique : les sujets qui doivent répéter la même expérience peuvent se lasser et/ou commencer à deviner le but de l'expérience et ainsi susciter un problème de désirabilité sociale (la propension des participants à vouloir réaliser ce qu'ils pensent que l'expérimentateur attend d'eux). Pour éviter cet effet, les participants ont dû réaliser trois projets d'architecture différents, tout en utilisant, tour à tour, trois media de conception qui leur ont été proposés de manière aléatoire.

4.3.2. Échantillon

L'échantillon est non probabiliste, constitué par disponibilité ou accidentellement (Sockeel & Anceaux, 2008). C'est une des techniques d'échantillonnage les plus utilisées, car la moins coûteuse en terme de recrutement. Toutefois, il peut exister un risque de généralisation des données, du fait de la non-représentativité de l'échantillon (Dancey & Reidy, 2007). Mais l'effectif assez élevé de notre échantillon demeure représentatif des étudiants de l'École d'architecture de l'Université Laval. En effet, 35 étudiants en architecture ont participé à cette recherche durant les sessions d'automne 2010 et d'hiver 2011 soit environ 13% des étudiants de l'École d'architecture de l'Université Laval. Les statistiques descriptives de l'échantillon sont présentées au prochain chapitre.

4.3.3. Procédures

L'expérimentation comporte deux étapes. La première concerne la conception de trois projets durant trois sessions expérimentales au cours desquelles chaque participant a dû utiliser aléatoirement l'un des trois media de conception. La seconde étape a consisté à évaluer la qualité des projets générés. L'étape « conception » a été menée durant 2 sessions

et l'évaluation de la production des participants s'est déroulée durant l'été et l'automne 2011. Ces deux étapes sont décrites à la suite.

▪ **L'étape 1 : La conception**

Durant trois sessions expérimentales, chaque participant a dû utiliser aléatoirement l'un des trois media de conception qui lui était imposé par l'expérimentateur (esquisse (E), Maquette (M) et Sketch-Up (SK)) et réaliser, en 22 minutes, l'un des trois projets suivants : un abribus, une station de recyclage (livre, vêtements, jouets) et des toilettes publiques. La complexité des trois projets a été jugée similaire par deux expérimentateurs et 2 étudiants gradués qui ont pré-testés les trois projets. Chaque projet contient six contraintes/critères de conception similaires (dimensions/proportions des espaces, fonctionnalité, etc.). Les trois projets sont présentés en annexe 1.

Par ailleurs, la limite de 22 minutes a été fixée en fonction du matériel nécessaire à l'expérimentation (voir section « matériel ») et de la complexité des projets. Le tableau 3 illustre la distribution des passations.

Tableau 3 : Organisation des sessions expérimentales

	<i>SESSION 1</i>	<i>SESSION 2</i>	<i>SESSION 3</i>
SUJET 1	PROJET1/MAQUETTE	PROJET3/SKETCH-UP	PROJET2/ESQUISSE
SUJET 2	PROJET3/MAQUETTE	PROJET2/ESQUISSE	PROJET1/SKETCH-UP
SUJET 3	PROJET2/ESQUISSE	PROJET1/MAQUETTE	PROJET3/SKETCH-UP
SUJET ...	PROJET.../MEDIUM...	PROJET.../MEDIUM...	PROJET.../MEDIUM...

Chaque session expérimentale dure environ 1h15-1h30 et comporte deux parties (cf. tableau 4) :

- Partie 1 : Après l'installation et la mise en place du matériel, chaque participant s'engage dans la conception de l'un des trois projets remis aléatoirement par l'expérimentateur en utilisant l'un des trois media de conception imposé aussi aléatoirement. Un intervalle d'au moins une semaine sépare chacune des sessions afin de réduire des biais liés à l'ordre et à la pratique. Lors de la première session expérimentale, le participant remplit deux formulaires : l'un relatif à son consentement pour participer à la recherche et un formulaire relatif à son « profil » (âge, sexe, maîtrise et intérêt dans l'usage des media de conception, etc.). Ensuite, la calibration du matériel peut durer entre 5 et 10 minutes dépendamment des sujets : le participant porte des lunettes pour l'analyse oculaire ainsi qu'un casque d'écoute pour la tâche secondaire (voir la section Matériel). Puis, les participants disposent de 3 minutes pour s'entraîner et s'habituer à utiliser le matériel pendant qu'ils travaillent sur un projet fictif (concevoir une maison) et pour permettre à l'expérimentateur de vérifier que l'enregistrement des données fonctionne bien. La description du projet ainsi que les consignes sont par la suite remises au participant qui dispose d'environ cinq minutes pour les lire. Durant toute l'expérimentation, la description du projet est affichée sur le mur, à droite du participant, pour qu'il puisse la consulter lorsqu'il le souhaite. Quant aux consignes (cf. annexe 2), elles indiquent essentiellement au participant qu'il dispose de 22 minutes pour réaliser le projet, qu'il peut s'arrêter et avertir l'expérimentateur s'il finit plus tôt. En outre, un chronomètre fixé sur le mur opposé, lui permet de suivre le temps écoulé. Enfin le point le plus important de ces consignes (signalé en gras sur la feuille remise) rappelle au participant que la tâche audio est secondaire, et qu'il doit se concentrer sur sa tâche principale de conception. À la fin de l'exercice de conception, le sujet répond au NASATLX et à un questionnaire portant sur sa perception de l'expérience.

Tableau 4 : Déroulement des sessions expérimentales

<i>PHASE 1 : CONCEPTION</i>	<i>DÉROULEMENT</i>	<i>DURÉE (MIN.)</i>
	1. Signature du formulaire de consentement	5
	2. Remise du formulaire de « profil du participant »	5
	3. Calibrage des mouvements oculaires/tâche secondaire	5-10
	4. Phase d'entraînement : tâche secondaire	3
	5. Remise et lecture des consignes et du projet	5
	6. Tâche principale : Réalisation du projet	22
	7. Passation du NASATLX	5
	8. Réponse au questionnaire	10
PAUSE		5
PHASE 2 TESTS PSY.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Session 1 : capacités spatiales ▪ Session 2 : style cognitif ▪ Session 3 : pensée divergente 	15-25
TOTAL		75-90

- **L'étape 2 : l'évaluation**

Un jury, composé de quatre architectes professionnels, bénéficiant d'au moins 5 ans d'expérience, et de quatre professeurs en architecture ont évalué, en fonction d'une grille de critères, les solutions proposées par les participants. La section « matériel » décrit cette grille remise aux évaluateurs.

4.3.4. Le matériel

Dans cette section, tout le matériel utilisé lors de l'expérimentation est présenté en fonction des quatre composantes de notre modèle théorique, et cette présentation est précédée d'une description de l'environnement dans lequel a eu lieu l'expérimentation.

Quelque soit le medium utilisé, les participants étaient en position debout face à une table à dessin. Cette table était fixée à une hauteur moyenne pour que tous les étudiants puissent l'utiliser sans modifier cette hauteur. L'environnement physique est demeuré inchangé pour tous les participants durant toute l'expérimentation afin d'éviter des biais expérimentaux, mais aussi pour répondre à des exigences liées à l'équipement de capture des mouvements des yeux (oculomètre). Une seconde table était juxtaposée à la table à dessin pour permettre aux participants de remplir les formulaires et les questionnaires. Les deux tables étaient séparées par un paravent pour permettre aux participants de se concentrer sur leur tâche et d'être isolés du bruit des locaux contigus. Les marques de couleur (post-it) et le fond noir visibles à la figure 17 ci-dessous, correspondent aux cibles requises pour l'utilisation de l'oculomètre.



Figure 17: L'environnement expérimental

4.3.4.1. Les types de media de conception

Au début de chaque session expérimentale, le participant est informé du medium qu'il devra utiliser, c'est-à-dire soit l'esquisse, la maquette ou le logiciel Sketch-Up (fig. 19).

- L'esquisse : pour réaliser l'esquisse de son projet, chaque sujet dispose du même matériel à savoir d'une tablette de papier calque (355mm X 452mm) qu'il peut utiliser sans limite de feuilles, de crayons/mine, de feutres, d'une efface (gomme) et d'une règle (fig. 18a).
- La maquette : pour réaliser la maquette, chaque participant dispose d'une tablette de 600mm X 450mm pour découper les cartons, de deux types de carton kraft de 150X150mm (3mm et 8mm d'épaisseur), de feuilles de plastique transparentes (150X150mm), de pâte à modeler, d'une règle, de crayons, d'un exacto (cutter) et d'un pistolet à colle (fig. 18b).
- Le logiciel Sketch-Up, version 7.0 (gratuite), est installé sur un ordinateur portable 15,4 pouces avec souris. Les étudiants ont le choix entre la version MAC ou PC du logiciel. Ce logiciel, dédié à la phase conceptuelle du processus de design, est largement utilisé dans les écoles d'architecture québécoises et françaises (fig. 18c).



Figure 18 : les trois media utilisés par les participants

4.3.4.2. Le concepteur

Plusieurs aptitudes des concepteurs sont évaluées dans le cadre du programme de recherche par des tests psychométriques : ses capacités spatiales, son style cognitif et sa pensée créative/divergente. Pour la présente thèse, seule la première aptitude est utilisée et décrite ci-dessous; les seconde et troisième aptitudes ne sont décrites que brièvement.

(1) **Mesure des capacités spatiales** : Le test psychométrique « Kit of Factor-Referenced Cognitive Tests » de Ekstrom et al. (1976) a été utilisé pour évaluer les capacités spatiales à l'exemple des travaux de Ho (2006) et Yukhina (2007). Ce kit contient 72 tests cognitifs utilisés pour l'évaluation de 23 facteurs cognitifs tels que la perception, les capacités verbales, les capacités visuo-spatiales, la mémoire, etc. Deux tests ont été sélectionnés à partir de ce kit pour leur rôle important en architecture : l'orientation spatiale et la visualisation spatiale (Ho, 2006 ; Keener et al., 2008). Une traduction en français de ces deux tests, validée par deux expérimentateurs, a été remise aux participants (cf. annexe 4). Ces tests sont présentés dans leur intégralité en annexe. Ils sont présentés ci-dessous selon l'ordre de leur administration durant l'expérimentation, soit lors de la phase 2 de la première partie expérimentale :

- Test de Rotation de Cartes/Card Rotation (RC) qui est un test d'orientation spatiale très cité dans la littérature portant sur les capacités spatiales. L'exercice consiste à fournir au participant une forme (à gauche de la ligne), et ce dernier doit indiquer si la forme a subi une rotation (il doit cocher S dans ce cas) ou la forme a été déplacée/retournée/flippée (il doit alors cocher D) (fig. 20). Le participant doit répondre à 20 questions réparties sur deux pages, chaque question comportant 8 réponses/formes différentes. Il dispose de trois minutes pour compléter chaque page, pour un total de six minutes.

Le score est calculé en fonction du nombre de bonnes réponses, pour un total de 160 points (8 réponses X 20 questions). Le participant perd un point par mauvaise réponse. Il n'y a pas de perte de points si la réponse n'est pas fournie. Le score final peut donc varier de -160 à 160 points.

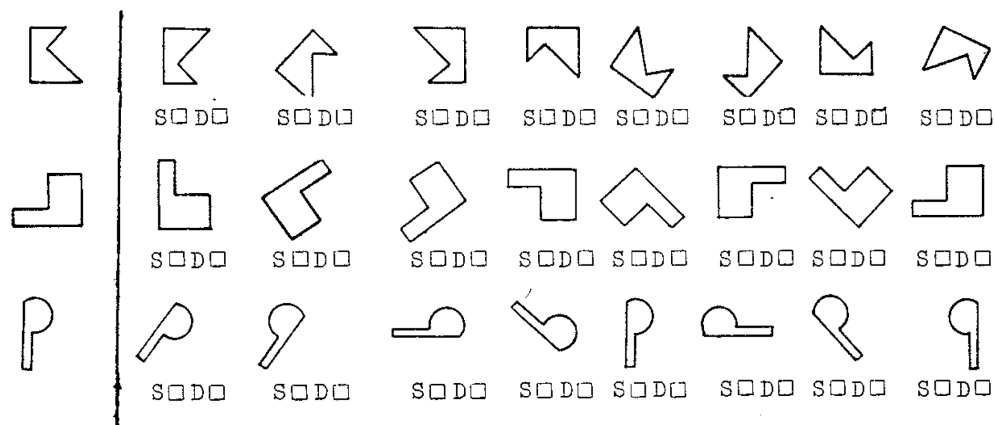


Figure 19 : Aperçu du test de rotation de cartes

- Le test de Pliage de Papier/Paper Folding (PP) est un test de visualisation spatiale. Le participant doit imaginer le pliage et le dépliage de morceaux de papier. Les figures de gauche (fig. 20a) représentent un morceau de papier carré qui est plié et la dernière de ces figures contient un ou deux petits cercles dessinés afin de montrer où le papier a été perforé. Le sujet doit déterminer laquelle des cinq figures à la droite de la ligne correspond à la position des trous lorsque le papier sera complètement déplié (fig. 20b).

Le participant doit répondre à 20 questions réparties sur deux pages, chaque question contient une réponse possible. Il dispose de trois minutes pour compléter chaque page, pour un total de six minutes. Un point est accordé par bonne réponse, mais le participant perd 0,25 point pour chaque réponse incorrecte. Il n'y a pas de perte de points si la réponse n'est pas fournie. Le score final peut donc varier de -5 à 20 points.

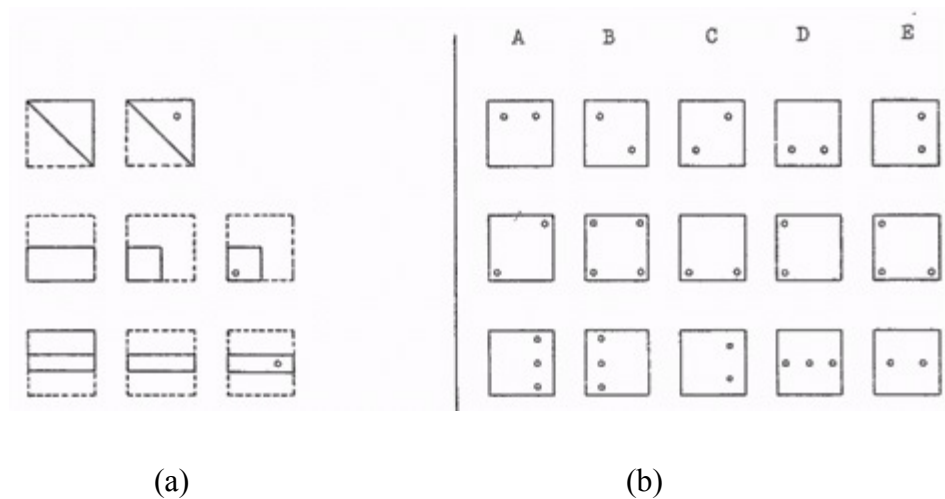


Figure 20: Aperçu du test de Pliage de Papier

- (2) **Le style cognitif** : la dépendance/indépendance à l'égard du champ a été mesurée via le Test des Formes Enchâssées (Embedded Figures Test) développé par Witkin et al. (1971). Une traduction en français de ce test, validée par deux expérimentateurs, a été remise aux participants. Ce test consiste à repérer une forme géométrique simple enchâssée dans une forme plus complexe (fig. 21). Il comporte 3 sections et un total de 25 figures doivent être localisées en 12 minutes : le participant dispose de deux minutes pour retrouver les sept premières figures dans la première section, puis de cinq minutes pour retrouver les neuf figures dans les deux autres sections du test. Les figures de la première section correspondant à un entraînement, sont plus simples que celles des sections deux et trois. Le participant ignore que cette première section ne sera pas évaluée. L'expérimentateur doit ensuite évaluer les réponses, avec un résultat possible variant de 0 à 18. Les omissions sont considérées comme des réponses incorrectes (Witkin et al., 1971).

Trouvez la forme simple « G »

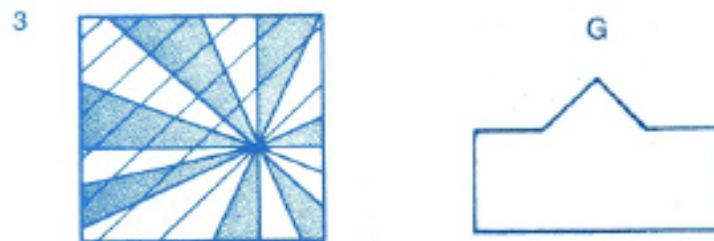


Figure 21: Exemple du Test de Figures Enchâssées de Witkin et al. (1971)

(3) **Le test sur la pensée divergente** : Le test psychométrique normé de Delis-Kaplan Executive Function System ou D-KEFS (Delis & Kaplan, 2001) a été utilisé pour évaluer les fonctions exécutives¹⁴. Dans le cadre du programme de recherche, il est utilisé pour évaluer la fluidité graphique et verbale des participants. La fluidité constitue un concept clé de la théorie de la pensée divergente proposée par Guilford (1976). Elle correspond à la capacité à produire beaucoup d'idées alternatives, à les combiner et à les réorganiser. Pour le test de fluidité graphique, le participant doit, entre autres, en 60 secondes, relier des points en faisant à chaque fois un dessin différent avec 4 lignes. Pour le test de la fluidité verbale, le participant doit, entre autres, en 60 secondes, citer le plus de mots commençant par la lettre A. Ce test normé, a été utilisé dans le but de déterminer si un participant qui dispose d'une bonne fluidité, donc de capacités de pensée divergente et de créativité, réalisera des projets de bonne qualité, quel que soit le medium utilisé.

Dans le cadre de cette thèse, les résultats des deux derniers tests ne sont pas présentés car leurs analyses nécessitent une revue de littérature importante et originale qui sera réalisée dans le cadre du programme de recherche.

4.3.3.3. Le processus de conception : Gestion de la charge cognitive

Une combinaison de plusieurs mesures de la charge cognitive est recommandée par plusieurs auteurs (Cegarra & Chevalier, 2008 ; Myake, 2001). Dans le cadre du programme de recherche, la charge cognitive a été mesurée de manière objective (au moyen d'une tâche secondaire (TS) et de l'oculométrie) et subjective (sur la base du questionnaire NASATLX). La thèse ne porte que sur deux types de mesures : celles issues de la TS et le NASATLX. Les résultats concernant l'oculométrie seront décrits brièvement mais seront l'objet d'une analyse détaillée dans le cadre du programme de recherche.

¹⁴ Les fonctions exécutives (FE) sont des processus cognitifs qui « englobent une multitude d'habiletés, telles la planification, la flexibilité cognitive, ..., Les situations requérant une prise de décision rapide, la résolution d'un problème complexe, la génération de comportements et de stratégies nouvelles ou l'inhibition d'une action habituelle forte font toutes appel aux FE ». (Packwood, 2011)

- **La tâche secondaire** : le principe de base de cette mesure comportementale, basée sur la performance, est que les ressources affectées à la tâche secondaire sont dépendantes de la quantité de ressources affectées à la tâche primaire (Bonnardel & Piolat, 2003), c'est-à-dire à la conception du projet dans notre cas. Ainsi, les ressources cognitives qui ne sont pas utilisées pour réaliser la tâche primaire, le sont pour la tâche secondaire. La performance pour réaliser cette tâche secondaire peut servir d'index de mesure de la charge cognitive pour la tâche primaire de conception.

L'usage de cette technique pour les besoins de notre expérimentation est décrit ci-dessous. Tout au long des 22 minutes de la tâche de conception, le participant qui porte un casque d'écoute, entend une série de chiffres de un à cinq d'une durée de 250ms et qui sont émis de façon aléatoire, à un rythme moyen de cinq secondes. Le participant doit appuyer sur une pédale le plus rapidement possible lorsqu'il entend deux fois de suite le même chiffre-cible (fig. 22). L'utilisation d'une pédale minimise l'interférence avec la tâche de conception puisque celle-ci nécessite l'usage des mains. Par ailleurs, le participant reçoit des instructions écrites lui signifiant qu'il doit prioriser sa tâche principale de conception.

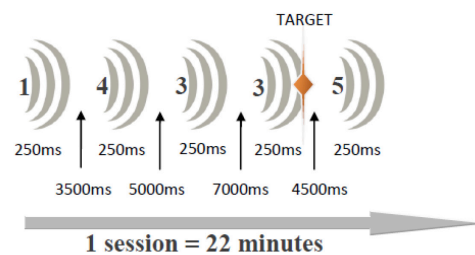


Figure 22: Description et matériel de la tâche secondaire

Deux métriques sont analysées par la suite : la sensibilité pour détecter les chiffre-cibles et le temps moyen de réaction. La sensibilité est un concept emprunté à la théorie de la

détection du signal, employée notamment en psychophysique. Dans cette branche de la psychologie qui étudie le rapport entre stimuli sensoriels et réaction physique, « la théorie de détection du signal, TDS » (Tanner & Swets, 1954) fut employée pour mesurer la performance des sujets lors des tâches de vigilance/attention, car elle prend en compte d'autres facteurs que la réponse au stimulus. Pour analyser la performance, on considère les réponses selon la présence ou non d'un signal (Tremblay, 2004). La TDS permet d'appréhender la stratégie du sujet (Putois, 2005) : il ne s'agit pas seulement de détecter les bonnes réponses (détection correcte, DC), soit lorsque le participant a appuyé sur la pédale correctement pour indiquer qu'il a entendu le chiffre-cible. Mais, aussi de discriminer les mauvaises réponses (rejet correct, RC), c'est-à-dire lorsque le participant n'a pas appuyé sur la pédale puisqu'il n'a pas entendu le chiffre-cible deux fois de suite. La sensibilité, c'est-à-dire la capacité à détecter correctement et sans erreur le signal (chiffre-cible), regroupe ces deux métriques : $S = (DC + RC)/2$. « Si la sensibilité est élevée alors la tâche est facile ou alors le participant a une bonne capacité de discrimination ; si la sensibilité est faible, alors la tâche est difficile ou le participant dispose d'une mauvaise capacité de discrimination » (Putois, 2005). L'intérêt de cette métrique (sensibilité) est de savoir, si en fonction des media de conception, cette sensibilité évolue différemment.

Quant au temps de réaction, il s'agit de la durée qui s'écoule entre le début de la présentation du stimulus (chiffre-cible) et le début de la réponse comportementale donnée à ce stimulus.

Un maximum de 25 bonnes réponses peut être fourni par le participant. Dans le cas où ce dernier termine avant les 22 minutes prévues, un ratio est appliqué à ses résultats afin de pouvoir les comparer avec ceux des autres participants : % de bonnes réponses (pour x minutes) = $(\# \text{ bonnes réponses} / (25 - \# \text{ réponses manquantes}) \times 100)$; 25 étant le nombre maximal de bonne réponses).

- **Le questionnaire NASATLX** : le participant doit exprimer un jugement quant à l'effort cognitif qu'il a consacré à la réalisation de la tâche. La version papier du questionnaire NASATLX, traduit en français, est remplie par le participant à la fin de chaque session expérimentale afin qu'il décrive sa perception de la charge

cognitive induite par l'expérience et par le medium de conception utilisé. Comme dans le test original du NASATLX, les six dimensions sont expliquées aux participants. Par exemple, pour la performance: "Dans quelle mesure avez-vous atteint les objectifs que vous vous étiez fixés" (cf. annexe 5).

Ces questionnaires subjectifs sont probablement les plus utilisés, car ils sont rapides et faciles à administrer, moins intrusifs et peu coûteux en terme économique et en temps d'analyse des données. Le NASATLX est considéré comme le plus sensible et le plus fiable des mesures subjectives (Hills et al., 2003). Les sujets doivent dans un premier temps, sur une échelle de 1 à 100 (1 = très faible (ou échec); 100 très fort (ou succès)), rendre compte de leur perception quant aux 6 dimensions du NASATLX : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort et frustration). La page 2 du NASATLX, présente au participant un tableau comportant 15 cases, chacune contenant deux des six dimensions précitées. Le participant doit cocher et choisir une dimension sur deux. L'échelle du NASATLX est jointe en annexe.

- **La pupillométrie :** Un oculomètre (Mobile Eye de ASL) loué au laboratoire CODOT de l'École de Psychologie de l'Université Laval a été porté par les participants durant les 22 minutes de chaque session expérimentale. Cet oculomètre de type lunette portative (« head mounted eye tracker »), est constitué d'une paire de lunettes sur lesquelles sont placées deux caméras. La première enregistre la scène ou l'environnement et la seconde enregistre les mouvements de l'œil droit et plus exactement le reflet cornéen d'une source infrarouge (fig. 23). Le système utilisé dans le cadre de cette recherche est le Mobile Eye de la compagnie Applied Science Laboratories (ASL). Ces lunettes oculométriques sont assorties d'un enregistreur vidéo portatif qui permet d'enregistrer toutes les données produites par les lunettes : nombre de fixations, durée des fixations, diamètre de la pupille, etc. Les résultats de ces mesures ne sont pas discutés dans la présente thèse car il nécessite un travail important d'analyse des données qui sera réalisée dans le cadre du programme de recherche.



Figure 23 : Le système Mobile Eye et son enregistreur vidéo

4.3.4.4 Le processus de conception : l'imagerie mentale

L'oculomètre utilisé a permis d'extraire des données supplémentaires qui, selon la littérature, peuvent constituer de bons indicateurs de l'imagerie mentale durant la tâche de conception (Brandt & Stark (1997), Laeng & Teodorescu (2002), Johansson & al. (2006), Côté et al. 2011). Les résultats concernant le nombre et le temps de fixations ainsi que l'analyse fractale des scanpath seront étudiés et discutés dans le cadre du programme de recherche (CRSNG). Néanmoins, ces résultats seront brièvement présentés au chapitre 5.

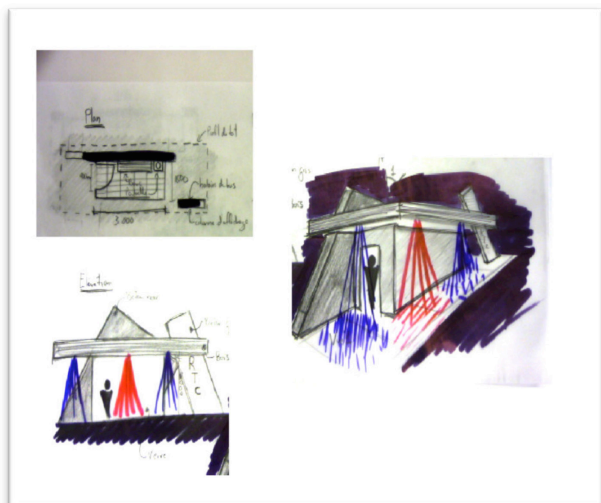
4.3.4.5 Évaluation des projets

La technique d'évaluation consensuelle proposée par Amabile (1996) est utilisée dans le cadre de cette recherche. Dans le but d'éviter tout biais, nous avons créé un fichier PowerPoint pour présenter les projets, les esquisses finales réalisées par les participants ont été scannées (un plan, une élévation et une perspective), des photos des maquettes ont été prises selon le même angle et point de vue (un plan, une élévation et une perspective) et enfin des images des projets ont été générées à partir du fichier Sketch-Up des étudiants (de nouveau, un plan, une élévation et une perspective). Les choix des images ou photos a été effectué par les étudiants. Le fichier Powerpoint a ensuite été remis aux juges. Pour éviter un effet d'ordre dans l'évaluation par les juges, les projets ont été classés aléatoirement en fonction des media de conception. Ainsi, un premier juge a évalué en premier les 35 projets réalisés sous la forme de maquettes, alors que le second juge a commencé par évaluer les esquisses, etc. De plus, l'ordre de présentation des projets a différé aussi selon le juge.

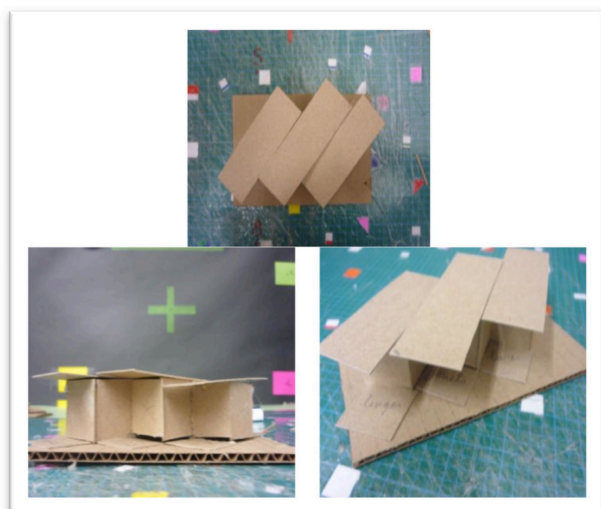
Ainsi, le premier juge a commencé par évaluer les projets des stations de recyclage (projet 2), puis les abribus (projet 1) et enfin les toilettes publiques (projet 3) alors que le second juge a débuté par une évaluation des projets d'abribus, puis des toilettes publiques et enfin des stations de recyclage, etc.

Huit juges experts ont été recrutés. Quatre des juges enseignent à l'École d'architecture et les quatre autres sont des architectes professionnels. Les huit juges ont évalué sur une échelle de type Lickert (allant de 0 à 5, les décimales étant acceptées) chaque projet de manière anonyme en fonction d'une grille d'évaluation qualitative (cf. annexe 2).

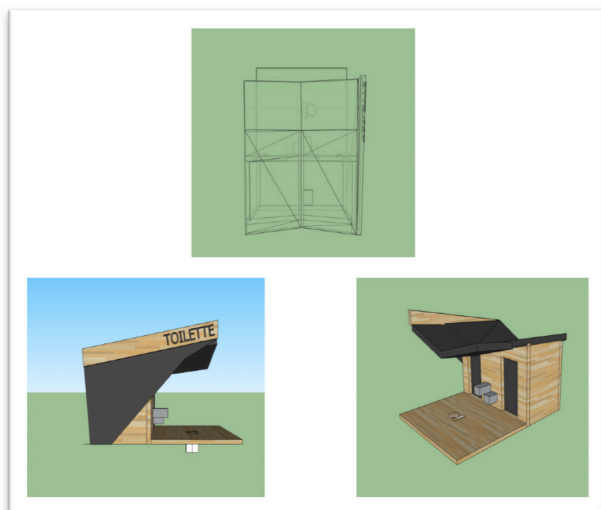
Cette grille est basée sur les critères d'évaluation de la créativité traditionnellement utilisés en design et en architecture (Yukhina, 2008; Casakin, 2008). En plus de l'évaluation globale des projets, les juges devaient évaluer les projets en fonction de trois critères spécifiques : l'esthétique, l'originalité et la fonctionnalité. Ces trois critères sont décrits dans la grille afin d'éviter une mauvaise interprétation des notions par les juges. Comme recommandé par Amabile (1996), les juges ont reçu la consigne d'évaluer les projets en les comparant entre eux, et non de manière absolue. Il leur a aussi été précisé que les étudiants avaient disposé de seulement 22 minutes pour réaliser leur projet et que la qualité des représentations pour cette phase conceptuelle ne devait pas constituer un critère de jugement. Un échantillon des projets réalisés, tel que soumis aux juges, est présenté dans la figure 24.



Esquisse – Projet 1



Maquette – Projet 2



Sketch-Up – Projet 3

Figure 24: Échantillon de projets tel que soumis aux juges

4.4. Analyse des données

Les données recueillies sont analysées statistiquement avec le logiciel SPSS v.19.0. Plusieurs techniques d'analyses statistiques sont présentées à la section « résultats » :

- Les analyses statistiques descriptives fournissent des informations sur les effectifs (N), la symétrie de la distribution, les mesures de tendance (moyenne (M), médiane, la variance (S^2), l'écart-type (σ) et les valeurs extrêmes).
- Les statistiques inférentielles sont utilisées pour déterminer s'il est possible de généraliser les résultats obtenus. Dans le cadre de cette thèse, trois techniques d'analyses statistiques inférentielles sont employées :
 - L'analyse de corrélation qui permet d'étudier la relation entre deux variables en utilisant le coefficient de corrélation du produit des moments de Pearson (r). Le test de corrélation ne permet pas d'établir un lien de causalité entre deux variables mais indique plutôt l'intensité (-1 à 1) et le lien (positif ou négatif) entre ces variables.
 - Le Test-t qui sert à déterminer si deux moyennes provenant de deux échantillons sont égales. Des Test-t pour des échantillons indépendants (comparaison de deux groupes, créés par une variable catégorielle (sexe ou cycle d'études), en fonction de leur moyenne à une variable continue) et pour des échantillons appariés (comparaison de deux groupes dont les participants ont été évalués deux fois à partir de la même variable continue).
 - L'analyse de variance univariée à mesures répétées qui permet de comparer les moyennes de trois groupes. Comme cela a été recommandé par Dancey et Reidy (2007), pour toutes nos analyses Anova, la correction de Greenhouse-Geisser (GG) a été utilisée pour présenter les résultats. Le test de GG fournit des résultats corrigés dans les cas où la sphéricité (covariance similaire entre les participants) n'est pas satisfaite. "Cela rend le test plus rigoureux, et réduit le risque d'erreur de première espèce dû à une violation des conditions d'application" (Dancey et Reidy, 2007).

4.5. Résumé

L'approche expérimentale décrite ci-dessous, inspirée des travaux en psychologie et en ergonomie cognitive, constitue un apport au domaine de la conception architecturale. La mixité des méthodes de mesure permet de traiter à la fois des données qualitatives et des données quantitatives. L'analyse des résultats dans le chapitre suivant tient compte de la nature de ces données.

Chapitre 5 : Présentation des résultats

Ce chapitre présente les résultats des analyses statistiques descriptives et inférentielles. Les données à analyser sont de nature quantitative (tests psychométriques, résultats obtenus lors de la tâche secondaire) et qualitative (évaluation des projets, questionnaire NASATLX, questionnaires post-expérimentaux).

Ce chapitre débute par une description des participants à la recherche, puis les résultats sont présentés en fonction des quatre composantes de notre modèle théorique : les media de conception, le concepteur, le processus de conception et enfin l'évaluation des projets de conception. Ces résultats sont discutés sommairement, le chapitre six suivant étant consacré à une mise en relation des résultats obtenus.

5.1 Participants

Trente-cinq (35) étudiants en architecture, vingt-un (21) étudiants et quatorze (14) étudiantes dont l'âge moyen était de 24,63 ans (écart-type : 3,08), ont participé à la recherche. Une analyse descriptive de cet échantillon en fonction du genre est présentée afin de comparer nos résultats avec ceux de Ho (2006) et Yukhina (2007), le genre pouvant devenir une variable explicative de certains résultats et ainsi intervenir dans la discussion présentée au chapitre suivant.

Par ailleurs, 22 de ces étudiants poursuivaient leurs études au Baccalauréat en architecture (équivalent de la Licence en France) mais avaient néanmoins déjà effectué la moitié de leur cursus¹⁵. Les 14 autres étudiants étaient gradués¹⁶ : 11 d'entre eux sont étudiants à la maîtrise professionnelle et/ou scientifique (équivalent du Master en France). Les trois (3) derniers ont débuté leur carrière comme architecte stagiaire. Selon la taxonomie de Dreyfus (2003), le premier groupe « Bac » correspond aux débutants avancés, alors que le second groupe « Gradué » correspond aux compétents.

¹⁵ Sur les six sessions que compte le Baccalauréat, les participants en étaient au moins à leur quatrième session lors de leur participation

¹⁶ Ces étudiants ont obtenu leur Baccalauréat (Licence).

De plus, concernant l'origine de la formation des participants, 21 proviennent de l'École d'architecture de l'Université Laval, 8 étudiants de différentes Écoles d'architecture françaises et les 6 derniers d'Algérie, d'Allemagne et de Belgique. La figure 25 illustre la répartition des participants.

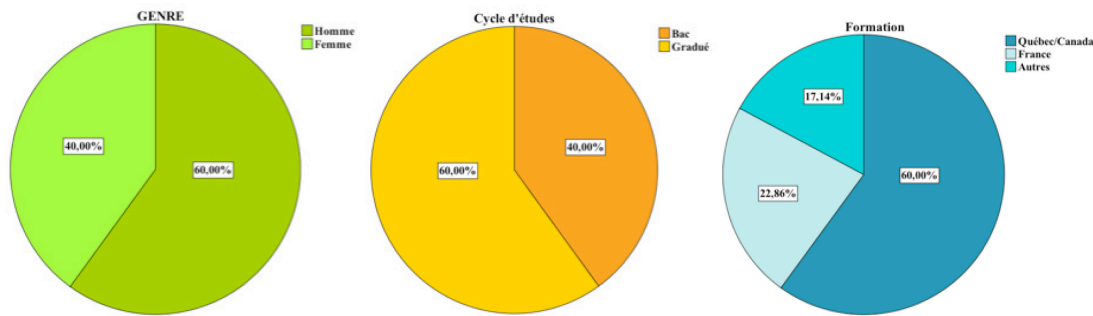


Figure 25: Description de l'échantillon en fonction du genre, du cycle d'études et de la formation académique

5.2 Préférence et maîtrise des media d'aide à la conception

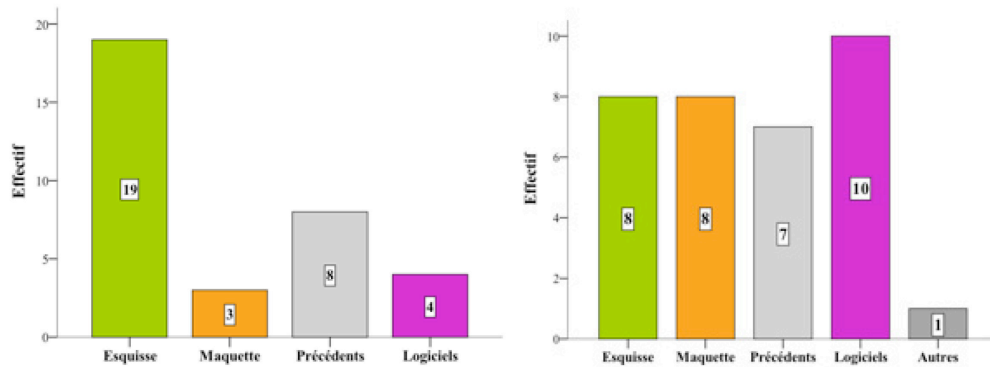
Cette section s'intéresse à l'auto-évaluation par les participants de leurs préférences et de leur maîtrise des media de conception lors de la phase d'idéation.

Dans le questionnaire « profil des participants », les étudiants doivent préciser les deux supports à la conception qu'ils préfèrent (fig. 26). Cinq possibilités de réponses leur sont proposées : esquisse, maquette, logiciels de CAO, précédents/exemples de projets¹⁷, ou autres. Comme premier medium, une analyse descriptive des réponses de 34 participants¹⁸ indique que les étudiants utilisent préférentiellement l'esquisse (19 participants) suivi des précédents (8 participants), les logiciels de CAO (4 participants) et enfin la maquette (3 participants). En ce qui concerne le second medium qu'ils préfèrent utiliser, les logiciels de CAO (10 participants) viennent au premier rang, suivis ex aequo de la maquette et de

¹⁷ Les précédents ou exemples de projets représentent un support à la conception, et non un medium de conception, qui permet aux concepteurs de développer leurs idées.

¹⁸ Un participant n'a pas rempli son formulaire « profil ».

l'esquisse (8 participants chacun) et des précédents (7 participants) ; enfin, un participant a choisi l'option « Autres ».

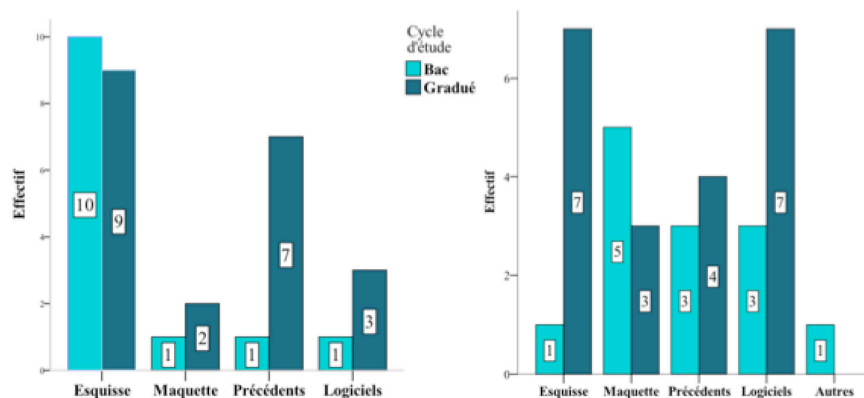


(a) Medium le plus utilisé

(b) Second medium le plus utilisé

Figure 26: Description des préférences des media d'aide à la conception par les participants

Une analyse descriptive des media préférés par les participants en fonction du cycle d'études ne montre aucun changement dans les préférences des étudiants pour le premier medium. Cependant, les résultats indiquent que les logiciels de CAO, comme second outil de conception, sont plus utilisés par des participants gradués que ceux de niveau Baccalauréat (fig. 27). Cela s'explique peut-être par l'apprentissage tardif des logiciels dans le cursus universitaire.



(a) Medium le plus utilisé

(b) Second medium le plus utilisé

Figure 27: Description des media de conception utilisés par les participants selon le cycle d'étude.

- Maîtrise des media d'aide à la conception

Dans le même questionnaire, les participants devaient auto-évaluer leur maîtrise des media de conception selon une échelle de type Lickert, sur 5 points répartis ainsi : aucune, débutant, passable, bon et excellent. Plusieurs choix de réponses leur sont proposés : logiciels de CAO (Sketch-Up, Autocad, FormZ, 3D studio¹⁹), esquisse et maquette. La figure 28 présente les résultats des auto-évaluations des 34 participants pour les trois media de conception, c'est-à-dire l'esquisse, la maquette et Sketch-Up. La figure 28 montre que pour l'esquisse, 17 participants se considèrent comme maîtrisant passablement ce medium, 13 le maîtrisent bien, et deux participants se considèrent comme « excellents » et de même pour les « débutants ». Alors que pour la maquette, 21 participants considèrent qu'ils maîtrisent bien ce medium, 8 qu'ils le maîtrisent passablement, quatre participants se considèrent comme « excellents » et enfin un participant se considère comme « débutant ». Enfin, pour le logiciel Sketch-Up, 14 participants se considèrent comme maîtrisant de manière excellente ce medium, neuf comme le maîtrisant bien, et sept passablement. En outre, trois des participants se considèrent comme « débutants » avec Sketch-Up alors qu'un participant indique n'avoir aucune maîtrise du logiciel.

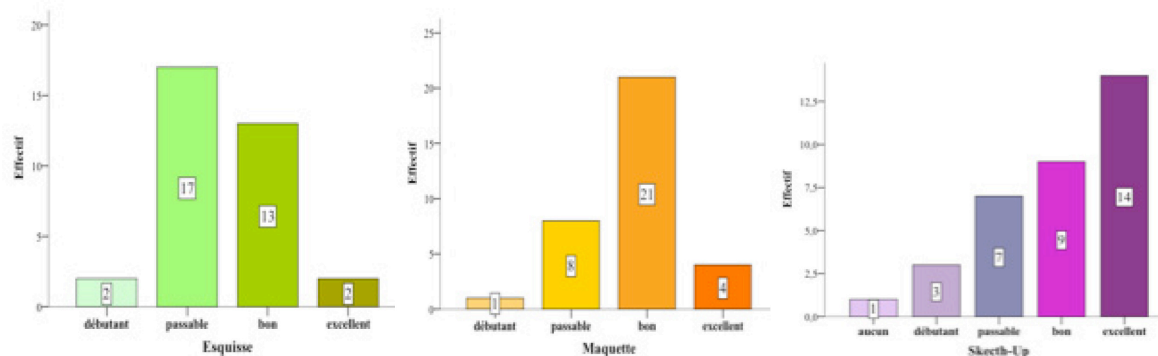


Figure 28: Description de la maîtrise des media de conception par les participants

Le tableau 5 suivant présente les résultats selon le genre et le cycle d'études. Ainsi, en général les participants pensent qu'ils maîtrisent mieux Sketch-Up ($M = 3,94$), puis la maquette ($M = 3,82$) et ensuite l'esquisse ($M = 3,44$).

¹⁹ Une échelle de type Lickert est dédiée à chacun des logiciels.

Tableau 5 : Perception de la maîtrise des media de conception selon le genre et le cycle d'étude

Perception de la maîtrise des media de conception selon le genre				
Sexe		Esquisse	Maquette	Skecth-Up
Homme N=20	Moyenne	3,50	3,95	4,00
	Ecart-type	0,60	0,75	1,29
Femme= N=14	Moyenne	3,36	3,64	3,86
	Ecart-type	0,84	0,49	0,86
Total N=34	Moyenne	3,44	3,82	3,94
	Ecart-type	0,70	0,67	1,12

Perception de la maîtrise des media de conception selon le cycle d'études				
Cycle d'études		Esquisse	Maquette	Skecth-Up
Bac N=13	Moyenne	3,23	3,77	3,62
	Ecart-type	0,83	0,43	0,87
Gradué N=22	Moyenne	3,57	3,86	4,14
	Ecart-type	0,59	0,81	1,23
Total N=35	Moyenne	3,44	3,82	3,94
	Ecart-type	0,70	0,67	1,12

Une analyse des moyennes selon le genre révèle que les participantes considèrent qu'elles maîtrisent moins bien les trois media. Ces différents résultats descriptifs concernant l'utilisation des media de conception indiquent que pour les étudiants, quel que soit leur cycle d'études, l'esquisse constitue leur premier choix pour la phase conceptuelle même s'ils concèdent que c'est le medium qu'ils maîtrisent le moins bien. Ce paradoxe pourrait être expliqué, comme le mentionnent plusieurs auteurs (Goel, 1995, Do et al., 2000), par le faible coût monétaire et d'effort d'apprentissage de l'esquisse pour être opérationnel par rapport à la maquette ou à un logiciel. Une autre hypothèse serait que la mauvaise qualité des représentations des étudiants qui n'ont pas de bonnes habiletés pour réaliser des esquisses ne nuit pas (ou peu) à leur travail. En effet, cela ne les empêcherait pas de comprendre et de poursuivre leur dialogue avec ces représentations puisqu'ils saisissent l'ambiguïté et l'imprécision de leurs esquisses.

5.3 Les capacités spatiales du concepteur

Dans le cadre de cette thèse, une aptitude a été sélectionnée pour son incidence en architecture : les capacités spatiales. La section suivante documente les résultats de la mesure de ces capacités en fonction de deux variables explicatives : le genre et le cycle d'études. Puis des analyses de corrélations entre ces aptitudes sont présentées.

Tel que mentionné dans la première partie de la thèse, plusieurs auteurs ont souligné l'importance des capacités spatiales pour les architectes (Smith, 1964 ; Taylor, 1980 ; Alias et al., 2002 ; Akin 2003 ; Keehner et al., 2004 ; Sorby, 2006 ; Ho, 2006 ; Yukhina 2007). Nos résultats peuvent être comparés avec ceux des deux derniers auteurs puisqu'ils ont utilisé le même matériel d'évaluation à savoir le « Kit of Factor – referenced Cognitive Tests », ainsi que les mêmes tests de visualisation spatiale VS (pliage de papier) et de rotation spatiale RS (rotation de cartes). La fidélité de ces tests (alpha de Cronbach) est assez bonne : Ekstrom et al. (1976) indiquent que pour des étudiants universitaires, la fiabilité est de 0,81 pour le test de VS et de 0,80 pour le test de RS.

Une analyse des capacités spatiales des 35 participants sur la base des tests de rotation spatiale (rotation de cartes) et de visualisation spatiale (test de pliage) a été effectuée en fonction du genre et du cycle d'études. Le tableau 6 présente les résultats descriptifs des deux tests de capacités spatiales selon le genre. La moyenne pour le test de RS est de 96,23 pour les hommes (écart-type $\sigma = 36,80$) et de 95,07 pour les femmes (écart-type $\sigma = 36,47$) ; alors que pour le test de VS, la moyenne est de 12,29 pour les hommes (écart-type $\sigma = 4,07$) et de 12,19 pour les femmes (écart-type $\sigma = 4,09$).

Les scores obtenus par les étudiants dans la présente recherche sont assez similaires à la moyenne rapportée dans les recherches de Ekstrom (1976) pour des étudiants universitaires (pour le test VS, 13,8 pour les H et 10,4 pour les F) ou Keehner et al. (2004) (pour le test de VS, une moyenne de 10,45, sans précision du genre). Si l'on compare nos résultats avec ceux d'étudiants en design (architecture + design industriel), on s'aperçoit également que nos résultats sont presque similaires à ceux de Ho (2006) pour le test de VS (H = 13,60 ($\sigma = 3,84$) et F = 12,32 ($\sigma = 3,41$)) mais qu'ils sont inférieurs aux siens pour le test de RS

(117,97 pour les H ($\sigma = 28,13$) et 99,46 pour les F ($\sigma = 27,99$)). De plus, l'écart-type est plus grand que celui obtenu par Ho (2006).

Tableau 6 : Statistiques descriptives des résultats des tests de capacités spatiales selon le genre

	Genre	N	Moyenne	Ecart-type
Rotation Spatiale	Homme	21	96,23	36,80
	Femme	14	95,07	36,47
Visualisation Spatiale	Homme	21	12,29	4,07
	Femme	14	12,19	4,09

Le tableau 7 présente les résultats d'une analyse de test-t avec échantillons indépendants qui compare les moyennes des scores obtenus selon le genre. Les résultats n'indiquent aucune différence significative entre les participants en fonction du genre pour les deux tests : RS ($t(33) = 0,092$, $p = 0,927$) et VS ($t(33) = 0,072$, $p = 0,943$). Au contraire, les résultats de Ho (2006) montraient une différence significative pour les tests de RS et VS. Une hypothèse explicative quant à cette différence serait que son échantillon comporte des étudiants en design industriel et en architecture, et le niveau de formation de ces étudiants variait de la première à la cinquième année. Nos résultats concordent néanmoins avec ceux de Yukhina (2007), et son échantillon de 60 étudiants en architecture, puisqu'elle aussi n'a détecté aucune différence significative en utilisant les tests RS et VS.

Tableau 7 : Test t d'échantillons indépendants comparant les scores des tests de capacités spatiales selon le genre

	Test-t pour égalité des moyennes				
	t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Différence écart-type
Rotation Spatiale	0,92	33	0,927	1,16	12,65
Visualisation Spatiale	0,72	33	0,943	0,101	1,40

Une comparaison des moyennes selon le cycle d'études a aussi été effectuée au moyen d'un test-t d'échantillons indépendants (Tableaux 8 et 9). Les résultats indiquent qu'il existe une différence significative pour le test de RS ($t(33) = 2,38$; $p = 0,023$) et de VS ($t(33) = 2,12$; $p = 0,041$).

Tableau 8 : Statistiques descriptive des résultats des tests de capacités spatiales selon le cycle d'études

	Cycle d'études	N	Moyenne	Ecart-type
Rotation Spatiale	Bac	14	79,07	31,24
	Gradué	21	106,90	35,50
Visualisation Spatiale	Bac	14	10,57	3,96
	Gradué	21	13,38	3,72

Tableau 9 : Test t d'échantillons indépendants comparant les scores des tests de capacités spatiales selon le cycle d'études

	Test-t pour égalité des moyennes				
	t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Différence écart-type
Rotation Spatiale	-2,38	33	0,023	-27,83	11,69
Visualisation Spatiale	-2,12	33	0,041	-2,80	1,31

Sur la base de ces deux tests, il semble que les étudiants développent leurs capacités spatiales au fur et à mesure de leur apprentissage académique. Ces résultats concordent avec ceux de l'étude de Yukhina (2007) qui a aussi remarqué une évolution des scores pour ses trois groupes de participants (première année, troisième année et cinquième année), mais avec une plus grande différence de scores entre les étudiants en première et en troisième année. Des analyses de corrélation ont ensuite été effectuées pour déterminer si les deux capacités spatiales (VS et RS) étaient en relation. Les résultats indiquent que les deux capacités sont fortement corrélées ($r = 0,862$, $p \leq .00$), ce qui concordent avec les résultats de Ho (2006) et Yukhina (2007). Cette corrélation est cohérente puisque la

visualisation spatiale (VS) requiert la capacité de manipuler et transformer mentalement des formes et, notamment, un travail de rotation spatiale (RS).

▪ **Corrélations entre capacités cognitives et maîtrise des media de conception**

Pour répondre à la question de recherche concernant la relation entre la maîtrise d'un type de medium de conception et les capacités spatiales, des analyses de corrélations linéaires r de Pearson ont été réalisées (tableau 10), en tenant compte de la nature qualitative de l'auto-évaluation des participants et leur perception quant à la maîtrise des media de conception. Les résultats n'indiquent pas de relation entre la maîtrise des media de conception et les capacités spatiales des participants, à l'exception d'une seule relation positive entre l'esquisse et la rotation spatiale ($r = 0,40$, $p = 0,01$). Ce résultat semble cohérent car, contrairement aux autres media de conception en 3D (maquette et SketchUp), la réalisation d'esquisses requiert des transformations (rotations) géométriques mentales entre la représentation mentale des objets en 3D et leur extériorisation en 2D sur les esquisses; ce qui pourrait nécessiter des capacités spatiales plus importantes.

Tableau 10 : Corrélations entre la maîtrise des media de conception et les tests de capacités spatiales

			Esquisse	Maquette	Sketch-Up
Corrélation de Pearson	Rotation Spatiale	Coeff. de corr.	0,40**	0,55	0,08
		Sig.	0,01	0,75	0,61
	Visualisation Spatiale	Coeff. de corr.	0,15	-1,37	0,04
		Sig.	0,37	0,43	0,81

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

5.4 La gestion de la charge cognitive durant le processus de conception

Selon notre modèle théorique (p. 95), la mesure de la charge cognitive nous renseigne indirectement sur l'imagerie mentale, ces deux processus cognitifs étant en relation lors de la réalisation d'une tâche de conception architecturale. Dans le cadre de cette thèse, la

charge cognitive est mesurée en combinant une mesure quantitative (technique de la tâche secondaire) et une mesure qualitative (NASATLX). Les résultats de ces deux mesures sont présentés ci-dessous, ainsi que les liens entre ces mesures et les capacités spatiales et la maîtrise des medias de conception.

5.4.1 Mesures quantitatives de la gestion de la charge cognitive

Deux métriques, issues de la théorie de la détection du signal, sont utilisées pour analyser les résultats obtenus lors de la réalisation de la tâche secondaire : la sensibilité ainsi que le temps moyen de réaction. En rappel, la sensibilité correspond à la capacité de détecter correctement et sans erreur le signal (deux fois de suite le même chiffre) et son calcul se base la formule suivante : $\text{Sensibilité} = (\text{Détection Correcte} + \text{Rejet Correct}) / 2$.

Il est à souligner que certains sujets ont fini leur tâche de conception en moins de 22 minutes. Dans ces cas, le ratio suivant a été appliqué aux résultats afin de pouvoir les comparer avec ceux des autres participants : $\% \text{ de bonnes réponses (pour } x \text{ minutes)} = (\# \text{ bonnes réponses} / (25 - \# \text{ réponses manquantes}) \times 100)$; 25 étant le nombre maximal de bonne réponses).

Pour analyser l'influence du medium (variable indépendante) sur la charge cognitive (variable dépendante) dans le cadre d'un plan à mesures répétées, des ANOVA ont été réalisées pour chacune des métriques mentionnées.

- **Résultats du taux de sensibilité à la détection des chiffres-cibles**

Les résultats descriptifs pour le taux de sensibilité à la détection des chiffres-cibles sont présentés dans le tableau 11:

Tableau 11 : statistiques descriptives pour la sensibilité

		ESQUISSE	MAQUETTE	SKETCH-UP
N	Valide	35	35	35
	Manquante	0	0	0
Moyenne		75,91	79,07	75,73
Médiane		76,19	78,00	77,77
Ecart-type		13,31	12,64	12,66

Une Anova à mesures répétées du taux de sensibilité a été réalisée et ne montre aucune différence significative ($F(2, 68) = 2,045$; $p = 0,141$) entre les trois media de conception (fig. 29).

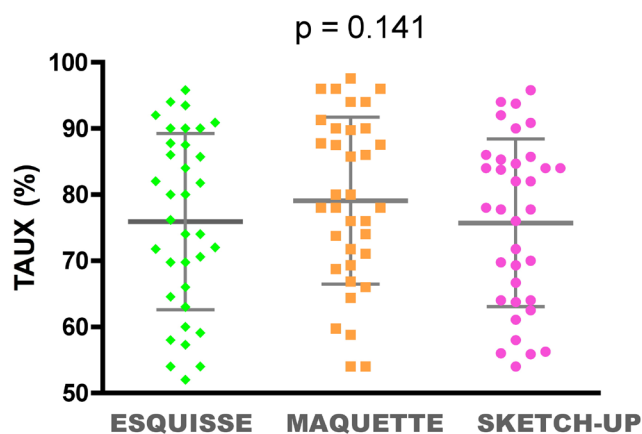


Figure 29: Anova à mesures répétées du taux de sensibilité

- **Résultats des temps de réaction à la détection des chiffres-cibles**

Les résultats descriptifs des temps de réaction à la détection des chiffres-cibles sont présentés au tableau 12.

Tableau 12 : statistiques descriptives des temps de réaction

		ESQUISSE	MAQUETTE	SKETCH-UP
N	Valide	35	35	35
	Manquante	0	0	0
Moyenne		1897,40	1741,28	1910,97
Médiane		1786,42	1624,68	1743,92
Ecart-type		552,91	443,98	628,06
Minimum		1044,58	1061,56	1033,31
Maximum		3726,00	3053,50	3774,50

En ce qui concerne le temps de réaction, une Anova à mesures répétées a aussi été réalisée. Les résultats ne montrent aucune différence significative entre les trois media ($F(2, 68) = 1,86 ; p = 0,173$) (fig. 30).

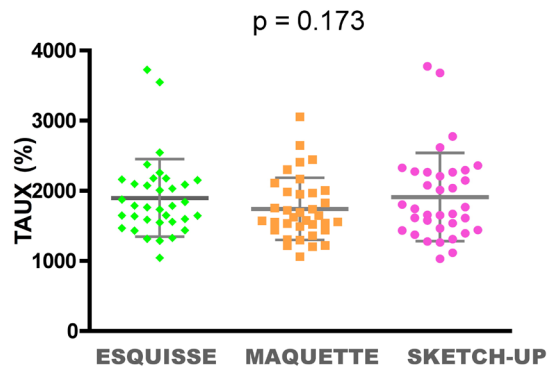


Figure 30 : Graphique représentant le temps de réaction par medium de conception

Les résultats de la mesure quantitative montrent qu'aucun medium de conception n'impose une charge cognitive additionnelle aux participants. Ce résultat constitue le rejet de l'hypothèse de recherche de la thèse et va à l'encontre des résultats des recherches précédentes et des observations qui avancent que l'esquisse permettrait de générer plus rapidement des solutions alternatives, nécessitant ainsi moins de charge cognitive. D'autres interprétations et explications sont discutées au chapitre suivant.

▪ Relation entre le Temps de Réaction (TR) et la Sensibilité (S)

Une autre question suite à ces résultats nous a semblé pertinente à examiner, soit : existe-t-il un lien entre TR et S indépendamment du medium utilisé? Pour y répondre, une analyse de corrélation entre les deux mesures TR et S a été effectuée et des diagrammes de dispersion générés (fig. 31). Les résultats indiquent que le TR et les S sont moyennement liés négativement, mais de manière significative pour l'esquisse ($n = 35, r = -0,427, p = 0,011$), la maquette ($n = 35, r = -0,519, p = 0,001$) et Sketch-Up ($n = 35, r = -0,515, p = 0,002$). Cela suggère que plus les participants prennent du temps à répondre, moins ils détectent correctement et sans erreur le signal (sensibilité), quel que soit le medium utilisé.

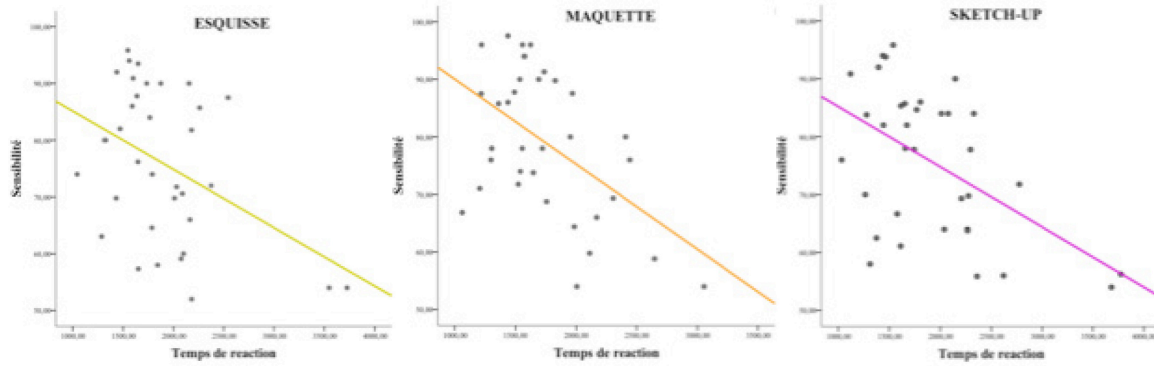


Figure 31: Diagrammes de dispersion entre les mesures de la charge cognitive et les trois media de conception

5.4.2 Mesure qualitative de la charge cognitive

L'Anova à mesures répétées réalisée sur les réponses obtenues au questionnaire NASATLX indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les trois media ($F(2, 68) = 1,37$; $p = 0,259$) (Fig. 32). Ainsi, selon ces résultats, les participants ne perçoivent pas de différences de charge cognitive selon le medium utilisé. Cette interprétation, obtenue sur la base du NASATLX, confirme les résultats quantitatifs présentés précédemment.

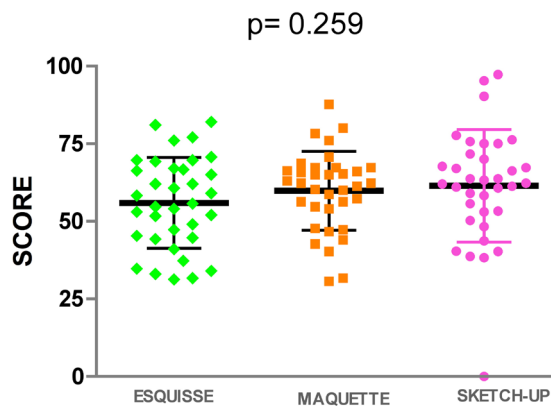


Figure 32 : Nuage de points du NASATLX

Le questionnaire NASATLX permet éventuellement d'identifier les sources de surcharge cognitive durant la réalisation de la tâche et ce grâce à sa nature multidimensionnelle (Hills

et al., 1992 ; Cegarra & Chevalier, 2008). Six Anova à mesures répétées ont été réalisées pour les six dimensions prises en compte dans le test.

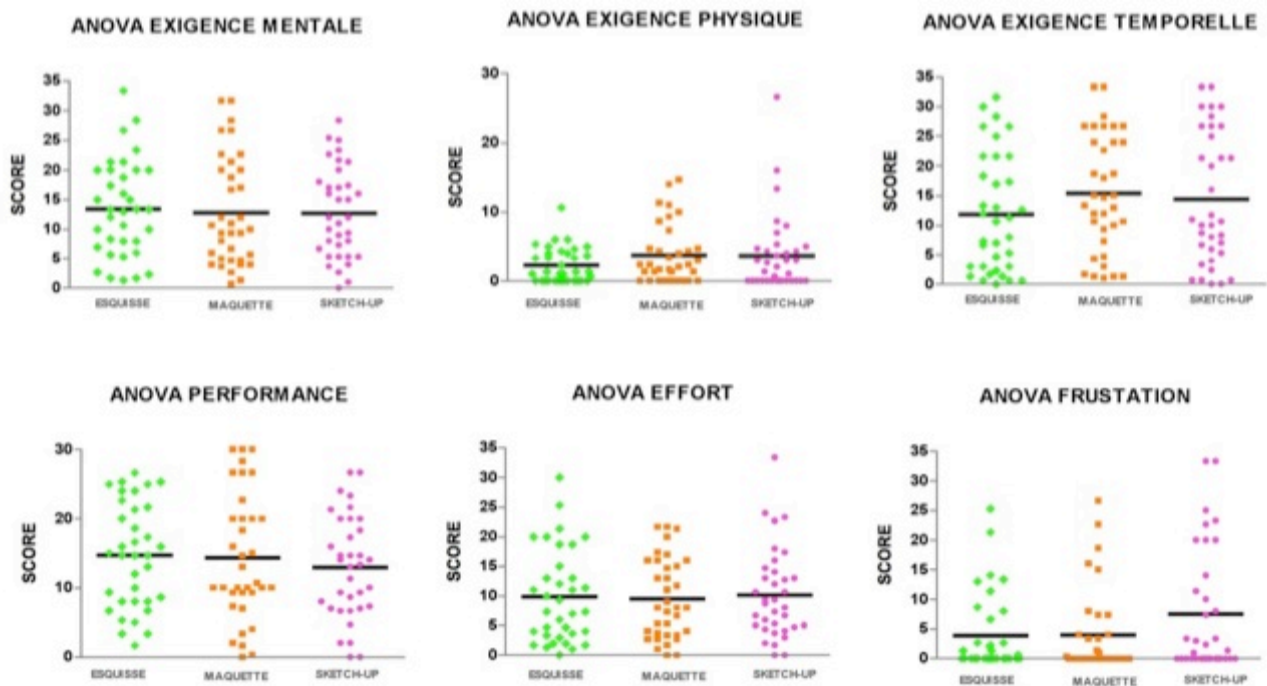


Figure 33 : Nuage de points pour les six dimensions du NASA TLX

Toutefois, les résultats ne montrent aucune différence significative selon les six dimensions considérées : exigence mentale ($p = 0,91$) ; exigence physique ($p = 0,15$) ; exigence temporelle ($p = 0,26$) ; performance ($p = 0,62$) ; effort ($p = 0,90$) ; frustration ($p = 0,10$) (Fig. 33).

5.4.3 Résultats de la pupillométrie

La dilatation des pupilles des participants a été mesurée pour les trois media de conception. Les résultats obtenus grâce à l'analyse des données fournis par l'oculomètre ne sont pas analysés dans le cadre de cette thèse, mais le seront dans le cadre du programme de recherche (CRSNG). D'une part, car l'ambiance lumineuse n'a pas été contrôlée expérimentalement et il est donc biaisé de comparer les résultats de la dilatation des pupilles présenté au tableau 13. Il faut donc analyser ces résultats selon une autre méthodologie comme celle employée par Cegarra et Chevalier (2008) qui consiste à créer

des courbes de variation du rayon de la pupille pour chaque participant durant sa tâche de conception, puis comparer ces courbes pour chaque medium afin de déceler les différences ou les convergences entre les media. Cette méthode requiert une quantité de travail importante qui sera réalisée dans le cadre du programme de recherche.

Tableau 13 : Résultats des mesures de la dilatation des pupilles (en pixels)

Participant	ESQUISSE	MAQUETTE	SKETCH-UP
	Diamètre pupille (Pixels) feuilles de calques	Diamètre pupille (pixels) Tablette	Diamètre pupille (pixels) Écran + Clavier
1	45,42		51,57
2	47,27	63,00	48,53
3	54,18	68,87	59,48
4	62,31	62,93	60,00
5	48,84	65,93	61,29
6	53,55	98,34	
7	77,08	100,19	68,27
8	58,44	0,00	68,33
9		0,00	55,46
10	46,58	0,00	27,21
11	52,88	63,12	49,09
12	71,10	84,90	72,95
13	66,78	79,54	46,71
14	67,39	69,75	43,34
15	71,20	104,65	54,22
16	88,68		83,55
17	83,65		74,45
18	71,76	92,37	52,92
19	78,56	64,24	46,62
20	80,96	77,24	55,72
21	66,77	82,79	57,07
22	60,14		43,97
23	0,00	97,20	
24	76,36		44,92
26	80,22	98,93	
27	72,19	66,18	
28		82,27	58,04
29		83,54	55,10
30	44,52	73,19	41,30
31	63,08	73,14	50,63
32		77,78	60,78
33	59,61	73,75	45,21
34	79,21	70,21	53,05
35		71,82	55,18
36	67,07	84,72	54,98
37	86,37	77,55	

Le tableau 13 présente les moyennes de la dilatation des pupilles des participants pour chaque media. Il présente des valeurs manquantes, cinq pour chaque media, car certaines données n'ont pas pu être enregistrées pour différentes raisons : le participant qui clignait souvent des yeux ou qui regardait de trop près son medium ou encore le logiciel utilisé qui n'a pas enregistré toutes les données. Ces différentes causes seront discutés et analysés dans le cadre du programme de recherche, futurs travaux et publications.

5.4.4 Relation entre les mesures de la charge cognitive et les capacités spatiales

Est-ce qu'il existe une relation entre les capacités spatiales et les mesures de la charge cognitive (TS et NASATLX) selon les media de conception? Le tableau 14 présente les résultats des calculs de corrélation obtenus entre les capacités spatiales et la charge cognitive. Ces résultats n'indiquent aucune relation entre les mesures objectives et subjectives de la charge cognitive et les capacités spatiales.

Tableau 14 : Corrélations entre capacité spatiale et charge cognitive

		p Rotation spatiale	p Visualisation spatiale
Esquisse_sensibilité	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,08 0,61	-0,05 0,77
Maquette_sensibilité	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,20 0,22	0,01 0,93
Sketch-Up_sensibilité	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,15 0,38	-0,01 0,92
Esquisse_temps de réaction	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,10 0,54	-0,05 0,75
Maquette_temps de réaction	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,02 0,87	-0,10 0,54
Sketch-Up_temps de réaction	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	0,29 0,08	0,11 0,50
Esquisse NASA	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,11 0,52	-0,01 0,91
Maquette NASA	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	-0,09 0,60	0,02 0,87
Sketch-Up NASA	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale)	0,17 0,33	0,17 0,30

5.5 Résultats de l'imagerie mentale

Tel que mentionné dans les chapitres précédents, les résultats obtenus grâce à l'étude des mouvements des yeux ne feront pas l'objet d'analyse dans le cadre de cette thèse. Les métriques supposées inférer sur l'imagerie mentale (nombre de fixation, et durée de fixations (ms), analyse fractales des scanpath) seront analysés ultérieurement. D'une part, car plusieurs données sont manquantes et il est donc impossible de comparer les trois media de conception en fonction du nombre et de la durée des fixations. En effet, lors de l'analyse des résultats, il est apparu que plusieurs données sont manquantes, surtout pour les participants utilisant l'esquisse ou la maquette. Le système utilisé (Mobile Eye de ASL) ne permettait pas d'enregistrer correctement les mouvements de l'œil des participants qui devaient se penchaient sur la table à dessin pour réaliser des esquisses ou des maquettes; ainsi, surtout pour la maquette, en moyenne 75% des données (mouvement de l'œil) n'ont pu être enregistrées alors que pour l'esquisse, cette moyenne est de 50%. En revanche, le système était bien adapté pour les utilisateurs de l'ordinateur, c'est-à-dire lorsque les participants regardaient l'écran d'ordinateur face à eux, en moyenne 95% des données ont été enregistrées par le système. Or dans un souci de validité écologique et pour ne pas imposer une contrainte et une intrusion supplémentaire, il était difficile d'imposer une façon de faire aux participants pour réaliser leurs esquisses et maquette, en inclinant la table à dessin par exemple, car cela aurait nuit à leur tâche.

D'autre part, ces résultats ne sont pas rapportés et analysés ici. Les analyses des scanpath, par exemple, sont réalisées dans le cadre du programme de recherche (CRSNG). L'annexe 9 présente un exemple d'analyse de la structure fractale des scanpaths.

Le tableau 15 présente sommairement les résultats obtenus par l'oculomètre du nombre et de la durée de fixations. Plusieurs données sont manquantes, notamment pour la maquette, car les participants ont tendance à se rapprocher de trop près de la maquette pour découper ou coller les morceaux de carton, ce qui empêchait le logiciel utilisé (GazeMap de ASL) d'enregistrer le mouvement de leurs yeux.

Tableau 15 : Résultats du nombre et de la durée de fixations

Participant	ESQUISSE		MAQUETTE		SKETCH-UP	
	NOMBRE DE FIXATION	DUREE MOYENNE DE FIXATION	NOMBRE DE FIXATION	DUREE MOYENNE DE FIXATION	NOMBRE DE FIXATION	DUREE MOYENNE DE FIXATION
	Calque		Tablette		Écran + Clavier	
1	4745	695,26	1	0	5224	714,5
2	197	27,76	7	1	5115	784,25
3	9	1,17	151	19	5666	917,28
4	2	0,23	319	38	3529	460,76
5	0	0,00	1329	176	6127	880,57
6	387	47,45	4238	603	3633	563,82
7	66	8,71	1391	182	5388	771,89
8	5082	719,12	0	0	6179	917,25
9	2925	386,98	0	0	5859	886,93
10	2406	386,63	0		3823	521,17
11	3437	557,97	920	132	6134	868,04
12	4539	610,68	703	87	5749	776,07
13	4713	657,02	13	2	6375	886,84
14	4013	542,76	1709	227	5979	805,56
15	5507	841,25	390	50	1118	140,31
16	253	32,77	286	35	3418	439,5
17	3077	437,73	0	0	4618	563,75
18	999	130,73	433	55	6086	260,41
19	2657	366,27	1029	132	4844	613,17
20	3040	466,69	3022	433	2722	366
21	4153	556,86	1074	145	3419	551,78
22	4536	629,96	1255	150	6039	871,38
23	3803	586,11	2023		5516	752,09
24	6235	899,02			5595	844,25
26	1095	136,41	3620	528	4241	586,42
27	5291	765,97	5074	751	6644	979,12
28	4489	601,59	1020	135	6216	910,3
29	1086	114,71	4683	671	5704	879,61
30	4468	624,79	766	101	3353	494,16
31	3979	550,34	465	110	2286	289,82
32	4756	682,98	1103	14	6022	893,11
33	3603	497,70	414	50	6366	915,99
34	644	81,41	1956	266	4249	555,85
35	4845	749,52	4665	690	5648	852,91
36	2535	322,16	264	36	5314	760,52
37	4829	676,11	3675	502		

Le caractère exploratoire de cette recherche pourrait permettre de découvrir et de documenter l'utilisation de l'oculométrie dans le domaine de la conception architecturale. En effet, les tâches de conception sont dynamiques et entraînent des mouvements parfois brusques des concepteurs notamment pour la maquette et l'esquisse, ce qui nuit à l'enregistrement des mouvements de l'oeil. Les forces et faiblesses de l'oculométrie, ainsi que les méthodes pour l'améliorer, seront traités dans le cadre du programme de recherche et de travaux futures.

5.6 Évaluation des productions

Afin de pouvoir évaluer les projets des participants sur la base de la Technique de l'Évaluation Consensuelle (TEC) proposée par Amabile (1983, 1996) (Chapitre 4), il faut tout d'abord s'assurer de l'accord entre les huit juges qui ont participé à cette recherche.

5.6.1 Accord inter-juges

Au début de ses recherches dans les années 80, Amabile se basait sur une technique développée par Winer (1971) nécessitant une analyse de la variance des scores des juges. Une seconde technique a consisté à utiliser la formule de prédiction de Spearman-Brown, basée sur le nombre de juges (n) et la moyenne des corrélations interjuges (r) :

$$\text{Fidélité} = \frac{nr}{1+(n-1)r}$$

Selon Amabile (1996), ces deux techniques permettent d'obtenir des résultats similaires mais, depuis les années 90, pour simplifier la procédure, le coefficient de Cronbach est utilisé dans les recherches en créativité impliquant la TEC (Amabile, 1996, Baer et al., 2004, Kaufman et al., 2008). Amabile justifie l'usage du coefficient alpha de Cronbach, qui est un indice statistique généralement utilisé pour valider la consistance interne des questionnaires ou des tests psychométriques, par la prémisse qu'un juge constitue une variable à effet fixe puisque « the reliability can conceptually be understood as estimating the degree of agreement if the same set of judges were to again assesses the products rated ».

Le coefficient de Cronbach est un indice qui varie de 0 à 1. Les différents auteurs qui l'ont utilisé dans le domaine de la créativité pour valider l'accord inter-juges dans leurs recherches (écriture, poésie, peinture), ont statué qu'un indice de 0,5 à 0,7 constitue un indice faible-moyen de fidélité et que 0,7 correspond à un bon accord interjuges (Amabile, 1996, Hennessey, 2004, 2009; Kaufman et al, 2004 et 2008, Baer et McKool, 2009). Cependant, certaines recherches considèrent un indice de 0,60 à 0,69 comme un indice de fidélité acceptable surtout lorsqu'il y a peu d'éléments (juges) à comparer (Leech et al., 2008), comme c'est le cas dans la présente recherche.

D'autres mesures de la fidélité inter-juges sont utilisées comme le coefficient de Kappa (pour un accord entre 2 juges) ou le coefficient de Kappa-Fleiss (pour un accord entre 2 juges et plus). Les chercheurs dans le domaine de la créativité et, notamment, en design industriel et en architecture (Amabile, 1983, 1996 ; Baer et al, 1994 ; Hennessey, 2003 ; Kaufman et al. 2004, 2008 ; Casakin, 2008 ; Yukhina, 2007) ont tendance à utiliser l'alpha de Cronbach et le coefficient de corrélation intra-classe (mesure d'association entre deux variables). Ces deux indices sont disponibles dans le progiciel SPSS et plusieurs études ont démontré qu'ils fournissent des mesures de fidélité inter-juges similaires (Amabile, 1996).

Ainsi, dans le cadre de notre recherche, comme dans celle de Yukhina (2007) dans le domaine de l'architecture, c'est le coefficient Alpha de Cronbach qui a été retenu comme mesure de la fidélité interjuges. Pour chacun des media de conception, le tableau 16 présente les résultats concernant l'accord entre les huit juges pour les quatre critères de la grille d'évaluation qui leur a été remise.

Les résultats nous indiquent un coefficient Alpha de Cronbach est supérieur à 0,70 dans la majorité des cas. Une lecture attentive des résultats indique que, dans le cas des esquisses, il y a un bon accord inter-juges ($> 0,80$) pour tous les critères d'évaluation. C'est également le cas pour les projets qui ont été réalisés avec Sketch-Up (sauf pour le critère de fonctionnalité, $\alpha = 0,646$). En ce qui concerne les maquettes, il apparaît que pour les critères d'évaluation globale et d'esthétique, l'alpha est inférieur 0,70 ; ce qui représente un accord inter-juge « minimalement adéquat » selon la formule de Leech et al. (2008). Quant aux deux autres critères d'originalité et de fonctionnalité pris en compte lors de l'évaluation des maquettes, l'accord inter-juges est considéré comme bon. Comme Leech et al. (2008) le font remarquer, les résultats oscillant entre 0,60 et 0,69 peuvent être considérés comme présentant un accord inter-juges minimalement adéquat à cause du nombre relativement réduit de juges. Tous les résultats des évaluations effectuées par les huit juges sont analysés et comparés²⁰.

²⁰ Une discussion de la variabilité de l'alpha de Cronbach est présentée dans le prochain chapitre.

Tableau 16: Résultats de l'accord inter-juges

	<i>Accord inter-juges (Alpha de Cronbach)</i>
Esquisse – évaluation globale	0,863
Esquisse – esthétique	0,861
Esquisse – originalité	0,874
Esquisse - fonctionnalité	0,806
Maquette – évaluation globale	0,652*
Maquette – esthétique	0,636*
Maquette – originalité	0,811
Maquette - fonctionnalité	0,766
Sketch-Up – évaluation globale	0,811
Sketch-Up - esthétique	0,834
Sketch-Up - originalité	0,880
Sketch-Up - fonctionnalité	0,655*

5.6.2 Comparaison des évaluations des projets

Des analyses descriptives et des Anovas à mesures répétées ont été réalisées afin de déterminer s'il existe une différence qualitative entre les projets selon les media de conception et en fonction des quatre critères d'évaluation suivants : l'évaluation globale, l'esthétique, l'originalité et la fonctionnalité.

- **Résultats des statistiques descriptives**

L'analyse des statistiques descriptives (Tableau 17) montre des moyennes similaires pour les trois media, avec des résultats légèrement supérieurs pour les projets réalisés avec le logiciel Sketch-Up. Aussi, des Anovas à mesures répétées ont été réalisées pour déterminer s'il existe une différence significative entre les media.

Tableau 17 : Statistiques descriptives des critères d'évaluation selon les média

	Esquisse				Maquette				Sketch-Up			
	G	E	O	F	G	E	O	F	G	E	O	F
Moyenne	2,21	1,94	1,88	2,60	2,30	2,14	2,03	2,59	2,32	2,20	1,92	2,54
Médiane	2,25	1,97	1,87	2,56	2,37	2,18	2,06	2,75	2,34	2,28	1,93	2,62
Ecart-type	0,65	0,73	0,77	0,61	0,47	0,51	0,67	0,61	0,62	0,71	0,75	0,60
									0	2		

G= globale ; E= esthétique ; O=Originalité ; F=Fonctionnalité

De plus, l'analyse des résultats descriptifs obtenus en fonction des quatre critères d'évaluation (Tableau 18) indiquent une augmentation des valeurs des évaluations avec les années d'études, quel que soit le médium utilisé. Des Anovas mixtes à mesures répétées seront réalisées pour déterminer s'il existe une différence significative entre les médias en fonction du cycle d'études.

Tableau 18 : Statistiques descriptives des critères d'évaluation selon les média et le cycle d'études

Critères	Medium	Cycle d'étude	Moyenne	Ecart-type	N
Globale	Esquisse	Bac	2,07	0,53	14
		Gradué	2,31	0,72	21
	Maquette	Bac	2,26	0,56	14
		Gradué	2,32	0,40	21
	Sketch-Up	Bac	2,10	0,67	14
		Gradué	2,46	0,55	21
Esthétique	Esquisse	Bac	1,88	0,61	14
		Gradué	1,97	0,81	21
	Maquette	Bac	2,08	0,65	14
		Gradué	2,18	0,41	21
	Sketch-Up	Bac	1,90	0,79	14
		Gradué	2,40	0,58	21
Originalité	Esquisse	Bac	1,76	0,58	14
		Gradué	1,96	0,88	21
	Maquette	Bac	2,03	0,90	14
		Gradué	2,02	0,49	21
	Sketch-Up	Bac	1,64	0,74	14
		Gradué	2,11	0,72	21
Fonctionnalité	Esquisse	Bac	2,37	0,67	14
		Gradué	2,76	0,53	21
	Maquette	Bac	2,50	0,57	14
		Gradué	2,65	0,64	21
	Sketch-Up	Bac	2,51	0,61	14
		Gradué	2,55	0,61	21

▪ Résultats des statistiques inférentielles (Anovas)

Les résultats de l'Anova²¹ à mesures répétées n'indiquent aucune différence significative entre les trois medias de conception pour les quatre critères de qualité des conceptions (cf. figure 34). Aucun medium ne semble donc avoir permis de générer des projets de meilleure qualité, que ce soit pour l'évaluation globale, ($F(2, 64) = 0,419$; $p = 0,647$), pour l'évaluation de l'esthétique ($F(2, 63) = 2,06$; $p = 0,139$), pour l'évaluation de l'originalité des projets ($F(2, 66) = 0,510$; $p = 0,597$) ou pour l'évaluation de la fonctionnalité ($F(2, 60) = 0,147$; $p = 0,835$).

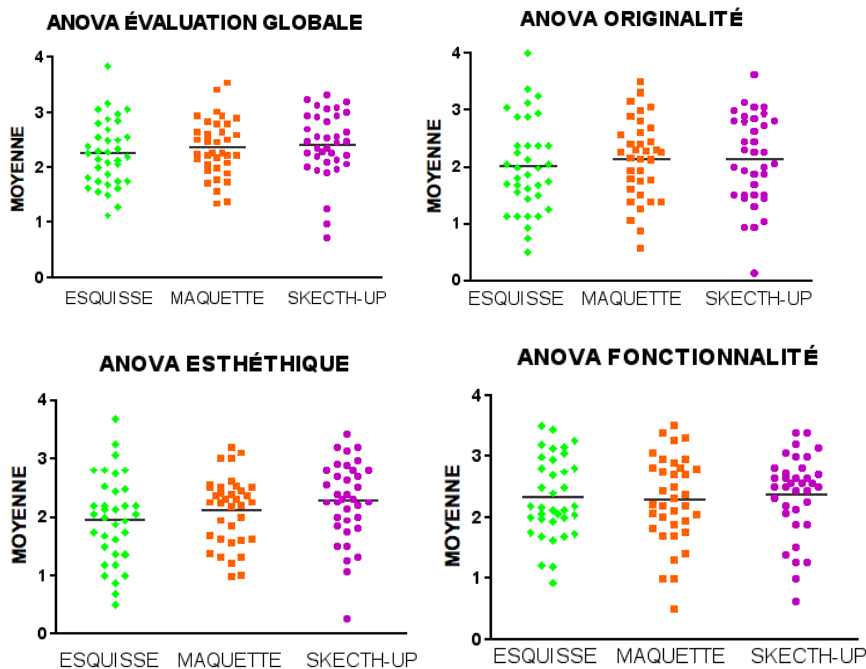


Figure 34 : Nuage de points selon les critères d'évaluation des évaluations des projets en fonction des trois media de conception

²¹ Les Anovas ont aussi été réalisées en supprimant les valeurs extrêmes. La significativité des résultats n'ayant pas été modifiée, nous avons donc décidé de garder toutes les données.

▪ Résultats des statistiques inférentielles (Anovas)

Une Anova mixte a ensuite été réalisée pour comparer les quatre critères d'évaluation des projets en fonction du cycle d'études. Contrairement aux résultats descriptifs, les résultats de l'anova n'indiquent aucune différence significative que ce soit pour l'évaluation globale ($F(1, 33) = 2,495$; $p = 0,124$), pour l'évaluation de l'esthétique ($F(1, 33) = 2,087$; $p = 0,158$), de l'originalité ($F(1, 33) = 1,520$; $p = 0,226$) ou pour la fonctionnalité ($F(1, 33) = 2,038$; $p = 0,163$).

5.6.3 Corrélation entre les évaluations de la qualité des projets

Une analyse plus approfondie des évaluations de la qualité des projets a été réalisée afin de documenter les liens entre les différents critères de l'évaluation en fonction des media de conception. Une analyse descriptive de toutes les évaluations (Tableau 19) indique que la fonctionnalité est l'élément qui est le mieux coté, quel que soit le medium utilisé, suivi de l'évaluation globale.

Tableau 19 : Moyennes des évaluations par medium

	Esq.	Esq.	Esq.	Esq.	Maq.	Maq.	Maq.	Maq.	SK	SK	SK	SK
	Global	Esth.	Origin.	Fonct.	Global	Esth.	Orig.	Fonct.	Global	Esth.	Origin.	Fonct.
Moyenne	2,23	1,96	1,90	2,62	2,32	2,16	2,04	2,63	2,32	2,21	1,93	2,54
Ecart-type	0,65	0,73	0,76	0,61	0,49	0,52	0,67	0,64	0,61	0,70	0,74	0,59
	2	0	5	9	4	8	1	3	3	0	4	5
Médiane	2,26	2,05	1,93	2,59	2,37	2,21	2,06	2,77	2,3594	2,29	1,93	2,65

Par la suite, des analyses de corrélation ont été effectuées pour chacun des medium de conception, afin de connaître dans quelles mesures les scores attribués aux critères d'évaluation étaient liés (cf. Tableau 20). En ce qui concerne l'évaluation globale, on note que les quatre critères sont fortement liés positivement mais avec une nuance cependant pour le critère de fonctionnalité qui est moyennement lié aux autres critères. Lors de l'évaluation des maquettes, les quatre critères sont également apparus positivement liés, mais là encore le critère de fonctionnalité demeure faiblement lié aux autres critères et même pas du tout lié au critère d'originalité. Enfin, lors de l'évaluation des projets réalisés

avec Sketch-Up, les quatre critères d'évaluation se sont révélés fortement corrélés positivement sauf pour la fonctionnalité.

L'analyse de ces résultats de corrélation indique que le critère de fonctionnalité est moins lié aux autres critères d'évaluation et qu'il est faiblement corrélé à l'originalité. Ces résultats semblent contradictoires avec ceux de Cross et al. (1999) et de Bonnardel et Wojtczuk (2011) qui ont réalisés des analyses factorielles sur différents critères d'évaluation dans le domaine du design industriel. Ces auteurs ont confirmé que le critère de fonctionnalité est celui qui influence le plus l'évaluation globale des projets. Une première hypothèse serait liée à la différence de domaine puisqu'en conception architecturale, la complexité des projets et des contraintes diffèrent par rapport au design industriel. Une autre hypothèse serait que le critère de fonctionnalité en architecture est celui qui est le plus tangible, le plus objectif par rapport aux autres critères qui accordent une part plus importante à la subjectivité des juges et de ce fait marque une indépendance avec les autres critères. Par ailleurs, les résultats indiquent que l'évaluation globale est plus fortement corrélée aux trois autres critères pour l'esquisse et le logiciel et pour la maquette.

Tableau 20 : Corrélations de Pearson des critères d'évaluation selon les média

ESQUISSE		Global	Esthétique	Originalité	Fonctionnalité
Globale	Corr. Pearson	1			
	Sig. (bil.)				
Esthétique	Corr. Pearson	0,94**	1		
	Sig. (bil.)	0,00			
Originalité	Corr. Pearson	0,88**	0,92**	1	
	Sig. (bil.)	0,00	0,00		
Fonctionnalité	Corr. Pearson	0,80**	0,62**	0,52**	1
	Sig. (bil.)	0,00	0,00	0,00	

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

MAQUETTE		Global	Esthétique	Originalité	Fonctionnalité
Globale	Corr. Pearson	1			
	Sig. (bil.)				
Esthétique	Corr. Pearson	0,88**	1		
	Sig. (bil.)	0,00			
Originalité	Corr. Pearson	0,70**	0,68**	1	
	Sig. (bil.)	0,00	0,00		
Fonctionnalité	Corr. Pearson	0,45**	0,27	-0,21	1
	Sig. (bil.)	0,05	0,10	0,21	

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

SKETCH-UP		Global	Esthétique	Originalité	Fonctionnalité
Globale	Corr. Pearson	1			
	Sig. (bil.)				
Esthétique	Corr. Pearson	0,92**	1		
	Sig. (bil.)	0,00			
Originalité	Corr. Pearson	0,85**	0,88**	1	
	Sig. (bil.)	0,00	0,00		
Fonctionnalité	Corr. Pearson	0,65**	0,48**	0,34*	1
	Sig. (bil.)	0,00	0,00	0,04	

5.6.4 Corrélation entre la charge cognitive et l'évaluation des projets

Est-ce qu'une charge cognitive élevée entraîne des projets de moindre qualité? En accord avec les considérations théoriques, la réponse à cette question devrait être positive puisqu'en effet, un concepteur dont la mémoire de travail est saturée aura tendance à mal la gérer et à développer ses idées à l'aide de représentations.

Pour répondre à cette question, des analyses de corrélation ont été effectuées pour déterminer s'il existe un lien entre les mesures objectives de la charge cognitive (Tâche secondaire) et les évaluations des projets. Les résultats n'indiquent aucune relation significative entre ces variables, quel que soit le médium utilisé. (Tableau 21). Ce qui signifie que la qualité des projets ne semble pas liée à une augmentation ou à une diminution de la charge cognitive.

Tableau 21 : Correlations entre charge cognitive

		Esquisse				Maquette				Sketch-Up			
		G	E	O	F	G	E	O	F	G	E	O	F
Sensibilité	Pearson	.18	.11	.14	.09	.27	.17	.23	.18	-.11	-.09	-.10	.02
	sig.	.30	.52	.42	.59	.11	.31	.17	.50	.50	.58	.55	.89
Temps de réaction	Pearson	-.02	-.01	-.02	.01	-.06	.04	-.10	-.11	.16	.08	.18	.03
	sig.	.87	.93	.87	.91	.70	.79	.56	.052	.33	.64	.28	.83

5.6.5 Corrélation entre les capacités spatiales et les évaluations des productions

Existe-il un lien entre les capacités spatiales d'un participant et la qualité des projets générés selon le medium utilisé ? Les participants qui ont de bonnes aptitudes visuo-spatiales, réalisent-ils de meilleurs projets, avec un medium spécifique ? Pour répondre à ces questions, des analyses de corrélation ont été effectuées entre les deux aptitudes spatiales (orientation et visualisation spatiales) et les critères d'évaluation des projets pris en compte pour chaque medium.

Tableau 22 : Corrélations de Pearson entre capacités spatiales et évaluations des projets

ÉVALUATION GLOBALE		Esq.	Maq.	S-U
Rotation spatiale	Corr. Pearson	0,34*	0,02	0,30
	Sig. (bil.)	0,04	0,90	0,07
Visualisation spatiale	Corr. Pearson	0,40*	0,02	0,29
	Sig. (bil.)	0,01	0,90	0,08

ÉVALUATION ORIGINALITÉ		Esq.	Maq.	S-U
Rotation spatiale	Corr. Pearson	0,36*	-0,06	0,32
	Sig. (bil.)	0,03	0,70	0,60
Visualisation spatiale	Corr. Pearson	0,37*	-0,07	0,27
	Sig. (bil.)	0,02	0,65	0,10

ÉVALUATION ESTHÉTIQUE		Esq.	Maq.	S-U
Rotation spatiale	Corr. Pearson	0,27	0,14	,28
	Sig. (bil.)	0,10	0,41	,09
Visualisation spatiale	Corr. Pearson	0,30	0,08	,26
	Sig. (bil.)	0,07	0,63	,12

ÉVALUATION FONCTIONNALITÉ		Esq.	Maq.	S-U
Rotation spatiale	Corr. Pearson	0,34*	0,15	0,15
	Sig. (bil.)	0,04	0,36	0,37
Visualisation spatiale	Corr. Pearson	0,47	0,21	0,18
	Sig. (bil.)	0,00**	0,22	0,28

Les résultats indiquent que les capacités spatiales sont corrélées positivement avec l'évaluation des projets réalisés avec l'esquisse pour trois critères : l'évaluation globale du projet, l'originalité et la fonctionnalité (tableau 22). Quant aux autres mediums de conception, il n'y a aucun lien significatif avec les capacités spatiales. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que contrairement aux autres media de conception en 3D (maquette et Sketch-Up), l'esquisse nécessite des transformations (rotations) géométriques, pour passer d'une représentation mentale 3D à une représentation extériorisée en 2D. Ce dialogue constant entre représentations 2D et 3D nécessiterait donc des capacités spatiales plus importantes.

5.7 Résultats des questionnaires

Dans le cadre de cette thèse, nous nous attardons sur les réponses aux questions ayant un rapport avec la validité écologique de l'expérimentation. Le but est de savoir si le contexte expérimental a influencé les participants durant le processus de conception et in-extenso la qualité des projets générés. Des analyses descriptives de quelques réponses fermées sont présentées, à la suite d'un rappel des questions qui ont été posées aux participants.

- Le temps imparti pour réaliser le projet était-il suffisant ?

Les résultats indiquent que pour tous les media de conception, le temps imparti semble suffisant. Pour la réalisation d'esquisses, 26 participants sur 35 confirment que la durée est suffisante ; pour la réalisation des maquettes, ce nombre est de 24 ; et enfin lors de l'utilisation de Sketch-Up, 21 participants trouvent le temps imparti suffisant.

- Les lunettes vous ont-elles physiquement dérangées durant la réalisation de votre tâche ?

Les résultats indiquent que pour tous les media de conception, le port des lunettes n'est pas perçu comme excessivement intrusif. Lors de la réalisation d'esquisses, 22 participants n'ont pas été dérangés par les lunettes ; lors de la réalisation des maquettes, ce nombre est de 23 ; et enfin lors de l'utilisation de Sketch-Up, c'est le cas pour 19 participants.

- Le port des écouteurs vous a-t-il physiquement dérangé/e durant la réalisation de votre tâche ?

Les résultats indiquent que pour tous les mediums, le port des écouteurs n'est pas perçu comme intrusif. Lors de la réalisation d'esquisses, 31 participants n'ont pas été dérangés par les écouteurs; lors de la réalisation de maquettes, ce nombre est de 29 ; et enfin lors de l'utilisation de Sketch-Up, c'est le cas pour 28 participants.

- La tâche secondaire (énumération des chiffres) vous-a-t-elle dérangé/e ?

Les résultats indiquent que pour tous les media, l'énumération des chiffres ne semble pas avoir perturbée les participants durant la réalisation de leur tâche principale. Lors de la réalisation de l'esquisse, 24 participants n'ont pas été dérangés par la tâche secondaire; dans le cas de la maquette et de Sketch-Up, c'est le cas pour 21 participants.

- La posture debout vous-a-t-elle dérangé(e) / perturbé(e) ?

Les résultats indiquent que pour tous les media, la posture debout n'est pas perçue comme dérangeante. Lors de la réalisation de l'esquisse, 23 participants n'ont pas été dérangés par cette posture; lors de la réalisation de la maquette, ce nombre est de 25 ; et enfin lors de l'utilisation de Sketch-Up, c'est le cas pour 18 participants.

Ces différents résultats suggèrent que, même si l'expérimentation n'est pas totalement valide écologiquement, notamment, à cause du stress engendré par le dispositif expérimental ou de la désirabilité sociale, les aspects intrusifs et inhabituels à un contexte de conception dans une école d'architecture ne semblent pas avoir dérangés les participants durant le processus de conception.

5.8 Résumé

Même si l'on ne peut répondre directement à la question de recherche principale (p. 106) car, statistiquement, on ne peut établir un lien de causalité entre toutes les variables étudiées, les résultats indiquent néanmoins qu'aucun medium de conception n'impose une charge additionnelle au processus de conception et incidemment n'influence pas les

résultats de ce processus c'est-à-dire la qualité des projets générés (fig. 35). Au prochain chapitre, les résultats présentés dans ce chapitre sont discutés, des hypothèses et des explications sont proposées portant sur l'influence des media de conception.

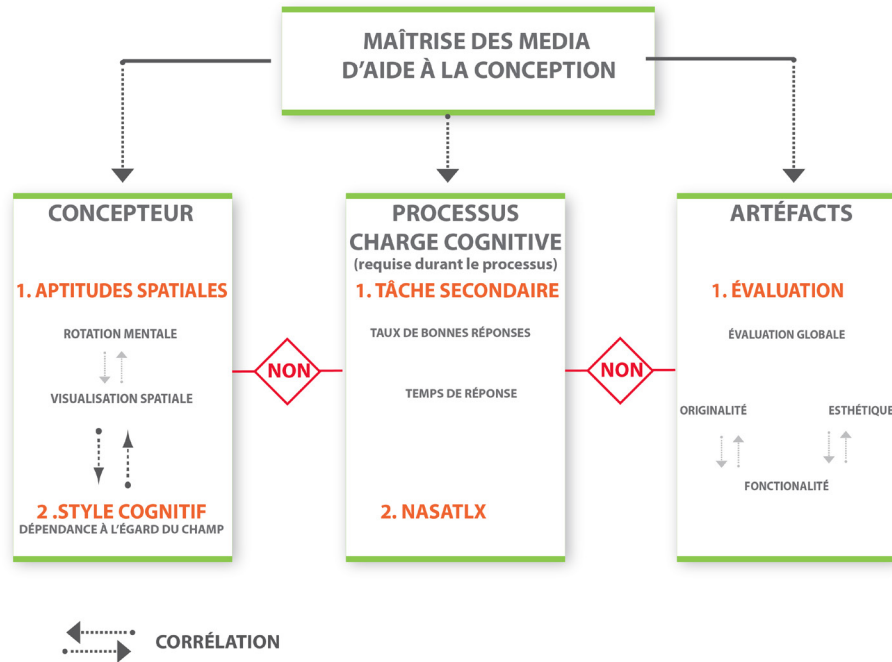


Figure 35 : Synthèse des résultats

Chapitre 6 : Discussion

Les résultats de cette recherche démontrent qu'il n'y a pas de différences significatives de l'incidence du type de medium sur la charge mental des participants. Plus spécifiquement, les résultats font ressortir que le medium utilisé que ce soit l'esquisse, la maquette ou le logiciel, n'impose pas de charge cognitive additionnelle aux participants-concepteurs; ce qui dans le cas contraire, aurait pour conséquence de réduire leur performance. De même, les résultats obtenus n'indiquent pas de différences significatives entre la qualité des projets générés à l'aide de ces trois media d'aide à la conception.

Dans une première partie, le chapitre six propose de répondre aux questions de recherche énoncées au chapitre quatre (section 4.1) en reprenant les composantes du modèle théorique dans cette ordre, soit : les media d'aide à la conception, le concepteur (capacités spatiales et la gestion de la charge cognitive) et enfin l'évaluation de la qualité des projets générés. La seconde partie discute de la méthodologie adoptée, de sa pertinence ainsi que des limites de la recherche.

6.1 Discussion relatives aux questions de recherche

Plusieurs questions de recherche ont été formulées dans le chapitre quatre. Cette section tente d'y répondre à partir des résultats des analyses statistiques descriptives et inférentielles présentées au chapitre cinq. Le caractère exploratoire de cette recherche appliquée au domaine de la conception architecturale qui emprunte méthodes et concepts à la psychologie et l'ergonomie cognitives a généré une discussion, parfois « spéculative », où les hypothèses et explications émises ne sont pas toujours étayées par une littérature robuste de études cognitives en conception. En effet, le nombre limité d'études, majoritairement qualitatives donc non généralisable, qui nous sert de référence empirique, présentent des résultats qui sont souvent contradictoires aux nôtres. Il fallait donc trouver des hypothèses basées sur notre expertise du domaine de la conception architecturale et des fondements théoriques empruntés à des domaines connexes à la conception architecturale : design industriel, sciences du génie et à ceux de la psychologie et de l'ergonomie cognitives.

6.1.1 Quel est le media de conception privilégié pour l'idéation?

Les résultats présentés au chapitre cinq indiquent que, lors de la phase d'idéation, 19 participants sur 35 ont désigné l'esquisse comme étant leur medium de conception favori, suivi de très loin par le logiciel Sketch-Up (quatre participants) et de la maquette (trois participants) et ce quel que soit le cycle d'études. Ainsi, la maquette qui ne requiert pas, a priori, de formation²² spécifique contrairement à l'esquisse et au logiciel, reste cependant le medium le moins privilégié par les participants. Par ailleurs, concernant la maîtrise des media, les statistiques descriptives suggèrent en moyenne une meilleure maîtrise du logiciel Sketch-Up par rapport à la maquette et à l'esquisse. De plus, les résultats montrent aussi une évolution générale de la maîtrise des media²³ par les participants proportionnelle à leur cycle d'études, présument ainsi de l'incidence de l'apprentissage et du développement d'une expertise dans la maîtrise des différents media.

Ainsi, utiliser de préférence un medium tel que l'esquisse que l'on maîtrise moins bien qu'un autre (par exemple, SketchUp) peut sembler contradictoire. En fait, cela semblerait confirmer les observations antérieures de Goel (1995) et de Do & al. (2001) qui soulignent l'importance de l'esquisse comme medium privilégié pour la conception. Le caractère flou et l'ambiguïté des représentations réalisées avec l'esquisse (Suwa et Tversky, 2000) semblent toujours primordiaux aux concepteurs malgré l'informatisation et la démocratisation des outils numériques. En effet, même s'ils maîtrisent mieux un logiciel comme SketchUp, les participants ne l'utiliseront pas spontanément et cela bien que cet outil 3D numérique soit spécialement dédié à la phase d'idéation (Tang & Gero, 2011). La rapidité à générer des esquisses, avec un moindre effort et coût (Romer et al. 2001), constitue probablement un l'avantage d'utiliser ce medium pour les participants.

Une hypothèse qui peut expliquer ces résultats serait liée à l'expertise des étudiants-concepteurs quant à leur maîtrise des media de conception. En effet, du moins à l'École d'Architecture de l'Université Laval, l'esquisse est l'un des premiers medium de représentation valorisé et dont les techniques de base sont enseignées aux étudiants. De ce

²² Que ce soit en France ou au Québec, des cours et formations extra ou intra-cursus sont données pour apprendre des logiciels ou le dessin, ce qui n'est pas le cas pour la maquette.

²³ Selon nos résultats, SketchUp est le medium qui est le plus sensible à l'apprentissage.

fait, il se pourrait que les étudiants-concepteurs aient développé des structures et des stratégies cognitives propres à ce médium. Leur maîtrise moins grande de l'esquisse par rapport aux autres médias, comme le logiciel 3D, ne remet pas en question le dialogue constant qui s'opère durant le processus d'idéation, entre la représentation mentale et la représentation externe. Les participants comprennent leurs esquisses, même si elles ont une mauvaise qualité graphique, voir même ininterprétables par d'autres, car ils sauraient saisir le caractère subjectif et opportuniste qui émerge de leurs croquis (Goldshmidt, 1991, Lebahar, 2007). Les résultats de l'évaluation de la qualité des projets semblent soutenir cette hypothèse puisqu'il n'y a pas de différence significative entre la qualité des projets générés par l'esquisse de celle des deux autres médias.

6.1.2 Quel est le lien entre la maîtrise des médias de conception et les capacités spatiales du concepteur?

Comme pour la maîtrise des médias de conception, les résultats indiquent une évolution des capacités spatiales des participants selon leur cycle d'études. En effet, il y a une incidence de l'apprentissage des médias sur leur maîtrise et une amélioration des capacités spatiales entre le premier cycle et le second cycle d'études.

Cependant, les résultats des analyses de corrélations entre deux capacités spatiales (visualisation et rotation spatiales) et la maîtrise des médias de conception indiquent une relation positive pour l'esquisse et la rotation spatiale, mais aucune relation pour les deux autres médias (Maquette et Sketch-up). Ces résultats demeurent cohérents avec ceux de la maîtrise des médias de conception puisque les participants affirment moins maîtriser l'esquisse : une hypothèse serait que leurs faibles capacités spatiales entraînent une difficulté à extérioriser graphiquement leurs idées et les bonnes proportions des espaces, entre autres. Contrairement aux deux autres médias, l'esquisse nécessite davantage de transformations géométriques mentales que la maquette ou le logiciel 3D car dans ces deux derniers cas, les données peuvent être représentées directement en 3D contrairement à l'esquisse.

6.1.3 Les capacités spatiales ont-elle une incidence sur la charge cognitive des concepteurs selon le medium utilisé ?

Comme le rappellent Sutton et Williams (2007), les architectes font constamment appel à leurs capacités visuo-spatiales, ces dernières étant nécessaires à la formation des images mentales, à leur développement et manipulation. Mais ces capacités spatiales influencent aussi la manière dont le concepteur interagit avec les media de conception qui ont leurs propres spécificités, notamment le caractère 2D ou 3D des données. Toujours selon ces auteurs la compréhension de la 3D (*3D understanding*) est très importante pour les architectes qui doivent extraire, l'information 3D à partir de dessins 2D et vice-versa : cette aptitude requiert « *des capacités visuelles pour interpréter ce qui est vu, et des capacités spatiales pour transformer et manipuler mentalement ces représentations visuelles* ». Il semble donc que les individus qui ont de bonnes capacités spatiales utilisent moins de ressources cognitives pour former leurs images mentales, ce qui réduirait leur charge cognitive. Dans le même ordre d'idée, le fait que la maquette et la représentation du logiciel 3D (sketch-Up) soient en 3D, suggère que ces deux media imposent une charge cognitive moindre que l'esquisse. Hegarty et Waller (2009) avancent aussi que les individus qui ont de bonnes capacités spatiales devraient normalement avoir plus de ressources pour traiter l'information spatiale et développer leurs images mentales. Ils pensent aussi qu'il existe une différence entre individu quant à la production et la gestion des représentations spatiales de qualité : « *high and low spatial individuals differs in the quality of the spatial representations, that they construct and their ability to maintain this quality after transforming the representations in different ways* ».

Or, dans le cadre de la présente recherche, les résultats des analyses de corrélations n'indiquent aucun lien entre les capacités spatiales et les mesures tant objectives (obtenues lors de la tâche secondaire) que subjectives (obtenues avec le questionnaire du NASATLX) de la charge cognitive. Deux interprétations sont proposées.

1. Nos mesures sont valides et alors il n'y a effectivement pas de relation entre les capacités spatiales et la charge cognitive. Cette affirmation se base sur la validité interne du matériel utilisé. Les tests psychométriques portant sur les capacités spatiales offrent une grande fidélité (.84 et .80 respectivement pour la visualisation

spatiale et l'orientation spatiale selon Elkstrom et al., 1976) et ont déjà été utilisés dans le domaine de la conception (Ho, 2006 ; Yukhna, 2007). Quant à la charge cognitive, la combinaison des évaluations subjectives et objectives indique qu'il n'y a pas de charge cognitive additionnelle pour les participants quelque soit le medium utilisé et qu'il n'y a pas d'association avec les deux capacités spatiales.

Cette absence de relation entre charge cognitive et capacités spatiales pourrait s'expliquer, entre autres, par la nature des projets soumis aux étudiants. L'échelle des projets (abribus, station de recyclage et toilettes publiques) pourrait ne pas nécessiter d'importantes ou complexes transformations géométriques. Une autre possibilité serait que les participants ont développé des stratégies métacognitives différentes pour concevoir. Ho (2006) parle de stratégies constructive ou analytique. Par exemple, pour se rendre d'un point A à un point B dans un édifice, certains individus vont créer une image mentale de l'espace en question pour leur permettre de se repérer (stratégie constructive) alors que d'autres vont se fier aux plans et autres indications/signalisation (stratégie analytique).

2. L'autre interprétation est que les tests psychométriques utilisés n'est pas adapté au caractère dynamique de la conception architecturale, qu'il y a donc une faiblesse au niveau de la validité interne de la recherche et ainsi les résultats des analyses de corrélations ne sont pas généralisables.

Ainsi, les tests de visualisation et d'orientation spatiales présentent des faiblesses liés à leur simplicité et à leur aspect statique. Concernant la simplicité, même si Ho (2006) utilise et base sa recherche sur les tests de Elkstrom et al. (1976), elle souligne que les tâches de conception sont plus complexes que les tests papier de visualisation et d'orientation spatiales : « The performance of the tests might not be consistent with that of the spatial cognition in design » (p.30). Quand à l'aspect statique des tests psychométriques, Hegarty et Waller (2009) suggèrent qu'ils ne sont peut-être pas adaptés pour évaluer les capacités spatiales dynamiques requises notamment lors de l'utilisation en temps réel de logiciels 3D. Pour ces auteurs, il faudrait davantage utiliser des tests adaptés aux capacités spatiales dynamiques qui

requièrent un raisonnement portant sur des stimuli en mouvement. Jones, Dunlap et Bilodeau (1986) ont montré que la performance en jeu vidéo requerrait des capacités spatiales différentes que celles testées par les tests traditionnels sur papier. Pour Hegarty et Waller (2009, p.136) : « clearly evidence for a dynamic spatial ability cannot be derived from tasks that require the same mental processes as static tests ». Pour ces auteurs, la question reste ouverte et des recherches doivent étayer cette hypothèse de l'existence de différences entre les capacités spatiales statiques et dynamiques.

Quant à la charge cognitive, deux théories sur les ressources cognitives s'opposent avec des résultats expérimentaux souvent contradictoires (Olive, 1997). La théorie du réservoir unique de ressources cognitives (Kahneman, 1973) suggère qu'il n'existe qu'un seul réservoir de ressources dans lequel puiseraient tous les processus cognitifs. « Ceux-ci seraient alors influencés dans leur fonctionnement par les ressources allouées aux autres processus, rendant les processus en jeu dans un traitement particulier interdépendants les uns des autres » (Olive, 1997). À l'opposé, si l'on se fie à la théorie des ressources multiples tel que proposé par Wickens (1984), le système cognitif possède plusieurs réservoirs de ressources visuospatiales et verbales notamment. De plus, chaque réservoir de ressources est indépendant : Certaines tâches de nature complètement différente peuvent être effectuées simultanément sans s'affecter mutuellement : « ainsi on peut plus facilement conduire en écoutant la radio que conduire en parlant au téléphone mobile » (Cantin, 2009).

Dans le cadre de notre recherche, la tâche secondaire a été réalisée en fonction de la première théorie de l'unicité du réservoir de ressources. Or, certains auteurs tels que Fisk et al. (1987) ont établis des règles pour pouvoir interpréter les performances lors de l'utilisation de la tâche secondaire. Pour ces auteurs, il faut respecter trois règles : (1) que la tâche secondaire reste constante tout au long de l'expérience (notre tâche secondaire a duré les 22 minutes de l'expérience) ; (2) que la tâche primaire soit prépondérante et principale durant l'expérience (dans le cadre de notre

recherche, la tâche primaire de conception était beaucoup plus complexe et prépondérante que la secondaire de détection, de plus une consigne spécifiait aux participants qu'ils devaient se concentrer sur la tâche principale de conception) ; et enfin, la troisième règle qui tient compte de la théorie de la multiplicité des ressources cognitives, stipule que : (3) il faut que les deux tâches puisent dans le même réservoir de ressources : si la tâche principale est visuo-spatiale (conception architecturale), la seconde tâche doit l'être aussi. Dans le cadre de notre expérience, cette troisième règle n'a pas été respectée : la tâche primaire était à dominance visuelle alors que la tâche secondaire était verbale (détection de chiffres cibles) et motrice (réponse en appuyant sur une pédale). Or si l'on ne suit pas ces trois règles, il devient difficile d'interpréter les résultats de la tâche secondaire.

Dans le cadre de cette recherche, la première interprétation nous semble plausible. En effet, les tests psychométriques utilisés ont démontré leur fidélité et fiabilité alors qu'on ne dispose pas de tests fiables et fidèles pour évaluer la différence entre capacités spatiales statiques versus dynamiques. De plus, les résultats ont indiqué une convergence des mesures qualitatives et quantitatives de la charge cognitive ; résultats qui n'indiquent aucune différence significative entre les media de conception. Lors du design de l'expérimentation, la troisième règle énoncée par Fisk et al. (1987) n'a pas été respectée car une tâche secondaire visuo-spatiale (ex : reconnaissance d'une cible visuelle (chiffre ou lettre), résolution de problèmes spatiaux, etc.) aurait été trop intrusif. De fait, O'Donnell and Eggemeier (1986, p.42-5) pensent plutôt que le caractère intrusif du matériel serait plus dommageable à la mesure de la charge cognitive : « The method should not be intrusive or interfere with performance of the operator's tasks, becoming a significant source of workload itself ». Par ailleurs, le fait que les participants aient réalisé les trois sessions expérimentales avec la même tâche secondaire, aurait fait ressortir une différence de performance si l'un des trois media de conception nécessitait plus de ressources cognitives. Or, encore une fois, il n'en n'est rien. Pour ces raisons, nous considérons que l'application de la troisième règle de Fisk et al. (1987) n'aurait pas influencé la mesure de la performance des participants et que les résultats de la mesure quantitative de la charge cognitive demeure valide. Des analyses ultérieures (programme de recherche CRSNG)

utilisant les résultats de l'oculométrie (dilatation des pupilles) pourrait confirmer ou infirmer la convergence des résultats obtenus pour la charge cognitive.

6.1.4 Les capacités spatiales sont-elles corrélées à l'évaluation de la qualité des projets générés?

Comme pour la question 6.1.2 concernant le lien entre la maîtrise des media de conception et les capacités spatiales du concepteur, il apparaît que les capacités spatiales sont corrélées positivement avec l'évaluation des projets réalisés avec l'esquisse pour trois critères : évaluation globale, originalité et fonctionnalité. En revanche, pour les autres media de conception, il n'y a aucun lien significatif avec les capacités spatiales. L'hypothèse qui semble cohérente est la même que précédemment : l'esquisse, contrairement aux deux autres media, nécessite des transformations géométriques mentales plus importantes et les participants qui ont de bonnes capacités spatiales représentent leurs espaces plus efficacement. Cela peut les aider à développer leurs idées, à les maintenir et les modifier plus facilement que si leurs représentations externes étaient incorrectes (perspectives incorrectes, ou fausses proportions, etc.). Par ailleurs, les juges, en évaluant certaines esquisses mal représentées, ont peut-être tendance à sous-évaluer ces projets puisqu'ils les interprètent incorrectement. Ainsi, la maîtrise de l'esquisse, les capacités spatiales et l'évaluation de la qualité des projets sont liées mais le lien de causalité reste à être démontré, soit : un participant qui maîtrise bien l'esquisse doit posséder de bonnes capacités spatiales pour générer et représenter adéquatement ses projets/idées.

6.1.5 Le type de medium de conception impose-t-il une charge cognitive additionnelle au concepteur ?

Les résultats qualitatifs (NASATLX) et quantitatifs (tâche secondaire) n'indiquent aucune différence significative entre les trois media d'aide à la conception en ce qui concerne la charge cognitive.

Les résultats des analyses de variance portant sur le questionnaire subjectif du NASATLX ainsi que ceux des six paramètres le composant (exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort et frustration) montrent qu'aucun des media n'impose une charge additionnelle aux participants pendant la réalisation de leur tâche de

conception. Comme plusieurs auteurs l'ont mentionné (Hill & al., 1992 ; Ceggara & Chevalier, 2008), le NASATLX est considéré comme le questionnaire le plus sensible et le plus fiable parmi les questionnaires qualitatifs pour mesurer la charge cognitive. Par ailleurs, son aspect multidimensionnel permet d'établir un bon diagnostic des paramètres qui peuvent induire une charge cognitive supplémentaire. Or, les résultats pour tous ces paramètres n'indiquent aucune différence significative entre les trois media de conception. Ces résultats viennent confirmer les résultats obtenus de manière quantitative par le biais de la mesure de la tâche secondaire, appelée aussi mesure comportementale ou mesure de performance.

Les résultats quantitatifs obtenus pour les deux métriques par le biais de la tâche secondaire, soit la sensibilité à détecter les bonnes réponses et le temps de réaction, n'ont pas montré de différence significative entre les trois media de conception. Par ailleurs, une analyse des corrélations suggère un lien négatif moyen entre la sensibilité et le temps de réaction des participants quel que soit le medium utilisé. Ainsi, les participants qui ont mis plus de temps pour appuyer sur la pédale et répondre au signal, ont fait plus d'erreurs.

La combinaison de ces deux mesures montre qu'aucun des media de conception n'impose une charge additionnelle aux participants. Ces résultats contredisent des observations précédentes qui suggèrent une plus grande efficacité de l'esquisse comme outil de conception lors de la phase conceptuelle. En effet, plusieurs auteurs avancent que l'esquisse, par sa rapidité et sa « spontanéité » à générer des solutions permettrait aux concepteurs une économie de ressources cognitives, cela est notamment suggéré par Bilda (2006) qui soutient que l'extériorisation de l'imagerie mentale via l'esquisse permet d'améliorer l'activité perceptuelle (relations géométriques entre les objets) des participants ce qui aurait pour tendance de réduire leur charge cognitive et d'améliorer leur performance. Or la maquette et le logiciel Sketchup, qui, encore une fois, est adapté à la phase conceptuelle, offrent la possibilité de générer, d'évaluer des idées en 3D et de les manipuler physiquement ou virtuellement.

Par ailleurs, il est possible que d'autres facteurs aient pu influencer l'activité cognitive des participants, facteurs qui n'ont pas été contrôlés durant l'expérimentation, tels que le stress,

la motivation (Amabile, 1996), le style cognitif, ou d'autres facteurs mentionnés par Lubart et al. (2003) comme les émotions et les facteurs environnementaux. Dans le cadre de cette recherche, il aura été impossible de contrôler ces différents facteurs à cause de la quantité de travail que cela aurait nécessité et l'objectif de cette recherche exploratoire étant de déterminer les principales caractéristiques cognitives chez un concepteur qui peuvent influencer son activité principale.

Enfin, comme cela a été mentionné, l'étude visant à mesurer la charge cognitive des participants de manière quantitative grâce à la pupillométrie se poursuit dans le cadre du programme de recherche CRSNG (Cegarra & Chevalier, 2008; Klinger, 2010). Les données de cette mesure²⁴ permettront de suivre l'évolution des ressources cognitives durant toute la durée de l'expérimentation, et ainsi permettront d'analyser les variations de la charge cognitive durant l'activité de conception et si cette variation change en fonction du medium utilisé.

6.1.6 Le type de medium a-t-il une incidence sur la qualité des projets générés?

Les analyses de variances (Anovas à mesures répétées) n'ont pas montré de différence significative entre les trois media de conception et ce pour les quatre critères d'évaluation des projets, soit : l'évaluation globale, l'esthétique, l'originalité et la fonctionnalité. Mais avant d'analyser les résultats des évaluations, un retour sur les résultats relatifs à l'accord inter-juges est nécessaire.

En effet, l'alpha de Cronbach qui mesure cet accord indique des valeurs très différentes selon le medium de conception. Il est excellent pour l'esquisse et pour le logiciel SketchUp (sauf pour la fonctionnalité, $\alpha=.655$) et il est minimalement adéquat pour la maquette (évaluation globale $\alpha=.652$ et esthétique $\alpha=.636$). Cette différence au niveau de l'accord inter-juges pourrait s'expliquer en partie par le support de présentation des projets. Ainsi, alors que les projets produits avec l'esquisse sont présentés aux juges en format 2D (les feuilles de calques ont été scannées), les maquettes ont perdu leur caractère 3D et leur

²⁴ Tel que décrit au chapitre quatre, les participants portaient un oculomètre durant la réalisation de leur tâche. Les données concernant la dilatation de la pupille pourront ainsi être analysées.

possibilité d'interagir physiquement avec elles puisque ce sont des photographies des maquettes qui ont été présentées au jury pour évaluation. De même des images synthèses ont été utilisées pour les projets réalisés avec le logiciel SketchUp qui ont ainsi perdu leur potentiel interactif 3D. Mais alors comment expliquer l'écart de la valeur de l'alpha entre les projets réalisés avec la maquette et le logiciel. Une explication serait que les juges experts ont l'habitude de visualiser des images 2D des projets réalisés avec SketchUp (présentement, les professeurs évaluent les travaux des étudiants présentés sur des planches en 2D) alors que l'évaluation des projets réalisés avec la maquette se fait avec elles physiquement, par interaction bi-manuelle. Il se peut donc, qu'il y ait une perte d'information qui explique ce décalage au niveau des valeurs de l'alpha pour les trois media de conception. Une future recherche pourrait établir si cet écart persiste lorsque les juges disposent et manipulent physiquement les trois media de conception.

Par ailleurs, le nombre de huit juges n'est pas le fruit du hasard. Au début, et selon la littérature, un nombre de cinq juges pouvait sembler suffisant pour atteindre une valeur alpha supérieure à .70 donc un accord inter-juges adéquat pour évaluer les productions créatives selon les exigences de la technique de l'évaluation consensuelle de Amabile (1983). Il s'est avéré que ce n'est qu'à partir seulement du huitième juge que l'on a atteint un accord adéquat ce qui pourrait s'expliquer par le nombre de paramètres d'évaluation relativement élevé (4 critères par medium, soit un total de 12 paramètres).

Une fois l'accord inter-juges atteint, les résultats des évaluations des projets générés par les participants n'ont pas permis de montrer de différence significative entre les trois media d'aide à la conception. De même, l'analyse de variance n'a indiqué aucune différence selon le cycle d'études.

Enfin, puisque la qualité des projets générés ne semble pas être influencée par le type de medium utilisé, cela peut signifier qu'aucun medium ne peut entraver le développement des idées et des images mentales, ni leur extériorisation : chaque outil offrirait ainsi un potentiel qui ne limite pas le concepteur dans sa tâche de conception.

6.1.7 Existe-t-il un lien entre charge cognitive et qualité des projets générés

La littérature et les travaux réalisés dans le domaine du design comme ceux de Bilda (2006) ont tendance à suggérer que les individus qui disposent de moins de ressources cognitives, en partie à cause du médium qu'ils utilisent pour concevoir, auront du mal à gérer et représenter leurs idées. Comme Bilda (2006) l'observe, l'imagerie mentale des concepteurs sature au bout d'un certain laps de temps, et l'extériorisation devient un moyen privilégié pour continuer à développer ses idées. Or si le médium de conception impose une charge cognitive supplémentaire aux concepteurs, on peut en déduire que cela nuira à leur performance et à la qualité des projets générés.

Les corrélations entre la charge cognitive (tâche secondaire) et les quatre critères d'évaluation des projets n'ont pas montré de lien significatif entre ces deux variables. Cela semble paradoxal compte-tenu de la théorie précédente. Une explication relative au protocole expérimental semble plausible : le temps imparti de 22 minutes pour réaliser le projet n'était pas suffisant pour requérir une charge cognitive additionnelle et ainsi saturer la mémoire de travail des participants. Bilda et Gero (2007) qui ont comparé les projets de plusieurs architectes experts dans deux conditions expérimentales (les yeux bandés ou pas) n'ont observé une diminution de la performance des concepteurs dans la condition où ils avaient les yeux bandés qu'au bout de 20 minutes. Cette hypothèse ne signifie pas, que durant les 22 minutes de l'expérimentation, une variation de la charge cognitive n'ait pas pu se produire.

6.2 Réflexion sur la méthodologie proposée

La diversité et l'ampleur des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse et du programme de recherche où elle s'inscrit, nécessitent une réflexion sur la proposition méthodologique adoptée, sur son apport mais aussi sur les limites de cette recherche et les difficultés rencontrées.

6.2.1. L'intérêt de la méthodologie mixte

L'apport principal de cette recherche au niveau méthodologique est d'adopter l'usage de la mixité des techniques quantitatives et qualitatives. L'objectivité des données mesurées

(temps de réaction, sensibilité pour détecter les bonnes réponses) et la fiabilité des outils (tests psychométriques) utilisés constituent les principales forces de la méthode quantitative. Mais dans le domaine des sciences sociales, comme en architecture, où la complexité des interactions entre différents facteurs est la règle, la méthode quantitative présente des lacunes notamment, à cause du caractère réductionniste de cette méthodologie qui implique une segmentation du processus de conception en quelques variables. En effet, la méthode quantitative expérimentale a tendance à étudier une variable ou deux à la fois même si le but est de développer des mesures qui soient elles bien adaptées en ne perturbant pas la complexité de ce qui est mesuré, ici la tâche de conception. L'usage de l'approche mixte nous a donc semblé actuellement souhaitable dans un champ de recherche tel que l'architecture. Le recours à la juxtaposition des mesures permet d'effectuer une lecture croisée des résultats qualitatifs et quantitatifs (Couvreur & Lehuede, 2002). Dans le cadre de la présente recherche, il s'agissait d'utiliser les données qualitatives pour aider à confirmer ou expliquer les résultats quantitatifs. Pour la charge cognitive par exemple, il est intéressant de savoir si la perception des participants quant à l'effort cognitif qu'ils ont effectué lors de la réalisation d'une tâche de conception concorde avec les mesures objectives de cet effort. De plus cette perception constitue un aspect important à considérer au niveau ergonomique puisqu'elle permet d'évaluer l'acceptation du medium utilisé par les concepteurs. D'autre part, l'utilisation de la méthode mixte s'impose d'elle même lorsqu'il n'existe pas de mesure quantitative d'un concept, comme pour l'évaluation des projets créatifs. Il est difficile de quantifier certains phénomènes où la subjectivité est fondamentale : quantifier ou opérationnaliser certains concepts nécessite plusieurs travaux pour confirmer la reproductibilité et la fidélité de cette opérationnalisation. Ainsi, on peut développer par exemple une mesure quantitative de la maîtrise par des participants d'un medium de conception (ex : rapidité pour exécuter une action ou réaliser une tâche) mais prouver que cette mesure est objective et quantifiable requiert des tests de fiabilité et de fidélité de cette mesure.

Cette étude exploratoire est avant-gardiste par la mixité des méthodes expérimentales utilisées et empruntées à la psychologie et l'ergonomie cognitives ainsi qu'aux méthodes d'analyses qualitatives du domaine de la créativité et des sciences sociales. Par exemple,

cette recherche a montré que les mesures qualitatives et quantitatives de la charge cognitive fournissent des résultats similaires, soit une convergence des deux mesures, ce qui pourrait être un bon indicateur de la validité des résultats et un meilleur diagnostic des ressources cognitives nécessaires lors de l'idéation architecturale. De plus, contrairement aux autres études mentionnées dans le cadre théorique (Do et al., 2000 ; Bilda, 2006 ; Yukhina, 2007), la méthodologie mixte développée a profité d'un plus grand nombre de sujets, tout en étudiant leur activité cognitive à la fois de manière objective et subjective. Du fait de cet échantillon plus important, les résultats obtenus deviennent plus fiables. La présente recherche a emprunté les forces de chacune des méthodes de recherche : soit la possibilité de décrire le phénomène étudié de la méthode qualitative, ainsi que le potentiel de généraliser et d'expliquer les résultats de l'approche quantitative (Giordano, 2003).

6.2.2 Limites de la recherche et travaux futurs

Cette recherche est exploratoire en ce sens que méthodologiquement et théoriquement, plusieurs techniques et concepts, appartenant à des domaines connexes, ont été appliqués de manière originale et pour la première fois au processus de la conception architecturale. Les limites de la thèse, les difficultés rencontrées ainsi que les travaux futurs sont énumérées ci-dessous:

1. Ce projet de thèse s'est centré sur le processus de conception et l'évaluation des projets générés, mais la nature des problèmes de conception, correspondant aux projets soumis aux étudiants, a été peu traitée. Pour Visser (2009, p.68), « la conception consiste à spécifier un artéfact (l'artéfact produit), à partir de spécifications de départ qui indiquent—en général de façon ni explicite, ni exhaustive—les fonctions à remplir par l'artéfact, ainsi que les besoins et buts qu'il doit satisfaire, étant donné certaines conditions (exprimées par des contraintes)». Notre recherche a focalisé sur l'importance des représentations internes et externes ainsi que sur l'évaluation des projets générés mais la complexité et l'échelle des projets a été peu abordée : la faible complexité des projets explique-t-elle la non-significativité des résultats au niveau de l'évaluation? Les précédents et exemples inclus dans le projet remis aux sujets auraient-ils pu influencer la tâche de

conception comme certains auteurs le suggèrent (Bonnardel & Marmeche, 2005 ; Mougenot, 2008)? Les contraintes ou critères de design à respecter ont-elles influencé la performance des participants? Une analyse qualitative approfondie du questionnaire remis aux participants après chaque expérience permet de répondre en partie aux questions soulevées ci-dessus. Ce travail d'analyse pourra être réalisé dans une recherche ultérieure.

2. Lors de la mesure quantitative de la charge cognitive (tâche secondaire), certains auteurs (Bonnardel & Piolat, 2003) recommandent une mesure plus précise en réalisant un pré-test. Ce pré-test permet d'obtenir une mesure de référence du temps de réaction (« baseline ») : sans réaliser aucune autre tâche, les participants doivent réagir au signal (présenté dans leur écouteur) en appuyant le plus rapidement possible sur la pédale. Cet exercice permet d'obtenir une mesure de référence qui sera déduite des temps de réaction obtenu lorsque les participants réalisent leur tâche principale de conception. Notre protocole expérimental étant assez chargé et le temps de l'expérimentation étant assez long, nous avons dû évacuer cette phase de pré-test qui peut durer de 10 à 15 minutes. Mais il serait intéressant de déterminer si cette mesure de référence aurait fournie une sensibilité supplémentaire pour analyser la charge cognitive.
3. L'accord inter-juges a varié selon les media de conception utilisés, en particulier pour la maquette. L'hypothèse avancée concerne la nature de ce medium et le support sur lequel il a été présenté : photographies des maquettes (2D). Ce type de support est inhabituel pour des juges de projet d'architecture, ces derniers ayant l'habitude de manipuler les maquettes, surtout au cours de la phase conceptuelle pour discuter de la qualité du projet. Une recherche future pourrait comparer des projets générés en utilisant le plein potentiel de chaque medium de conception : Chaque juge pourrait manipuler les maquettes et aura accès au logiciel SketchUp et pourrait interagir avec le modèle 3D.
4. Concernant le troisième medium d'aide à la conception, le logiciel SketchUp, nos résultats ne peuvent être généralisés à tous les logiciels d'aide à la conception

architecturale. Chaque logiciel présente des spécificités et par conséquent nécessite des interactions plus ou moins complexes et des ressources cognitives différentes. De même, la qualité des représentations des données dans ce logiciel précis et le rendu des projets générés est spécifique à ce logiciel, ce qui a pu influencer l'évaluation effectuée par les juges ; ces derniers ayant interprété la qualité des projets en fonction des représentations générés avec ce logiciel.

5. Enfin, au niveau statistique, la présente thèse a tenté de répondre aux questions de recherche en se basant sur des analyses de corrélations entre les variables et non des régressions multiples statistiques en raison du nombre de participants. Il a été très difficile de recruter des étudiants en architecture à cause de la durée de l'expérimentation qui se déroulait en trois sessions de 1h15 à 1h30 chacune, mais aussi à cause de la population ciblée (étudiants en architecture qui ont effectué au moins trois sessions académiques). Sur un bassin d'environ 300 étudiants disponibles à l'école d'architecture de l'Université Laval, 35 étudiants ont été recrutés de manière non probabiliste ($\pm 13\%$), en supposant que la distribution des caractéristiques à l'intérieur de la population soit homogène. Or les analyses de corrélation permettent d'établir des relations entre les variables, mais non des liens de causalité. Des analyses de régression auraient permis d'appuyer statistiquement ces liens de causalité qui ont un pouvoir d'inférence plus puissant statistiquement. Pour pouvoir effectuer des analyses de régression multiple, selon Tabachnick et Fidell (1996), il faut disposer d'un minimum de 50 participants, auxquels il faut rajouter huit participants pour chaque paramètre ou coefficient additionnel lors d'analyses de régression multiple.

Au cours des différentes étapes de la réalisation de cette recherche exploratoire, plusieurs questionnements ont émergé nécessitant parfois un repositionnement au niveau des questions de recherche et de la méthodologie. La multidisciplinarité de la recherche impliquait des connaissances issues de plusieurs domaines telles que l'architecture, l'ergonomie et les facteurs humains, la psychologie cognitive et les statistiques. Il fallait ainsi développer un discours et faire des choix entre plusieurs approches théoriques en

cognition spatiale, sur l'imagerie mentale, l'unicité ou la multiplicité des réservoirs de ressources cognitives, etc.. Ainsi, il est probable que cette recherche exploratoire ait omis de traiter avec concision de certains concepts. Quant au protocole expérimental, le recrutement des participants a été laborieux notamment à cause de la durée des sessions expérimentales et du fait qu'il n'y a pas encore de culture de recrutement pour des recherches expérimentales de cette échelle à l'école d'architecture de l'Université Laval.

Conclusions

L'objectif principal de la présente thèse était d'analyser l'activité cognitive d'architectes novices durant leur phase d'idéation, en documentant l'incidence des media de conception sur leur performance de gestion de leur charge cognitive et la qualité de leur projet produit. Empruntée au domaine de la psychologie expérimentale et au domaine des études cognitives de la conception, une méthodologie mixte est proposée pour illustrer le lien entre les media utilisés, le processus de conception et son résultat.

Trois media de conception, traditionnellement employés dans les écoles d'architecture et dans les milieux professionnels, ont été comparés, c'est-à-dire l'esquisse, la maquette et le logiciel 3D (ici, SketchUp). Un modèle théorique a été proposé puis opérationnalisé. Quatre composantes principales structurent ce modèle : les media d'aide à la conception, le concepteur, le processus et l'artéfact généré. Comme il est impossible d'analyser et de contrôler expérimentalement tous les facteurs impliqués dans un processus aussi complexe que la conception architecturale, seuls quelques facteurs ont été choisis en fonction de leur importance théorique. Ainsi les capacités spatiales du concepteur ont été mesurées, de même que la gestion de la charge cognitive mobilisée durant la réalisation de l'activité de conception; et enfin, la qualité des projets a été évaluée par huit juges experts. Les résultats de ces mesures, présentés au chapitre 5, n'ont montré aucune différence significative induite par les media de conception quant à la gestion de la charge cognitive des participants, ni au niveau de la qualité des projets générés. Ces résultats suggèrent que les media de conception n'ont pas une influence sur la gestion de la charge cognitive des participants-concepteurs. Une explication proposée serait que chacun des media ayant son propre potentiel permettrait aux participants, une fois maîtrisé, de représenter leurs idées de manière assez efficace et satisfaisante.

Chaque media de conception offre des opportunités de conception différentes. Le dialogue qui s'engage entre le concepteur et ses représentations fait émerger des opportunités propres à chaque media. Par exemple, utiliser des primitives (cube, cylindre, pyramide,

cône, etc.), leur appliquer des transformations géométriques, les manipuler avec un logiciel tel que SketchUp et obtenir ainsi des volumes ou espaces complexes, crée indéniablement des opportunités qui peuvent induire l'émergence d'idées chez le concepteur, différentes probablement, mais au même titre que celles développées par l'esquisse ou la maquette. Comme le souligne Keehner et al (2008), les propriétés des représentations externes influencent notre manière d'interagir avec elles. Elles structurent et ancrent les stratégies cognitives et métacognitives mises en œuvre pour générer des images mentales. Hors, ces représentations externes sont dépendantes du medium utilisé pour les générées.

Concernant les activités de conception telles que l'architecture, il est admis que toute activité a un coût au niveau cognitif (Bonnardel, 2006). Durant l'idéation architecturale, le cycle exploration-génération-évaluation des idées sollicite des ressources cognitives pour explorer le programme architectural, générer et développer des images mentales du projet en devenir et les évaluer. De même, chaque medium, compte-tenu de ses spécificités, requiert des ressources cognitives :

1. L'esquisse : comme cela a été mentionné dans la première partie de cette thèse, plusieurs études se sont consacrées à l'analyse des esquisses comme medium de conception. L'usage des esquisses joue ainsi plusieurs rôles, notamment, pour compenser les limites de la mémoire de travail (Cardella & al., 2005). La rapidité de l'esquisse, son faible coût monétaire d'utilisation, l'apprentissage précoce de ce medium dans les écoles, en font un outil privilégié par les concepteurs. En devenant expert avec ce medium, les concepteurs développent des stratégies cognitives et une compréhension du caractère flou et ambiguë qui en découle. En effet, comme le rappelle Matlin (2001), les experts semblent meilleurs que les novices pour utiliser leurs aptitudes métacognitives, en allouant leur temps de manière appropriée pendant la résolution des problèmes. Aussi facile soit-il à utiliser, ce medium sollicite néanmoins des ressources cognitives, notamment, en raison des opérations géométriques qui sont nécessaires pour jongler entre les représentations mentales 3D et l'esquisse en 2D. Nos résultats ont d'ailleurs montré un lien entre la maîtrise de l'esquisse et les capacités spatiales des participants.

2. La maquette : comme le rappelle Dorta (2001) la maquette d'architecture propose certes des avantages, notamment, grâce la tridimensionnalité des espaces créés. Pour Furness (1987), l'utilisation de plusieurs modalités pourrait améliorer la créativité; or la maquette permet un usage simultané des processus visuels, moteurs et mentaux. De plus la maquette utilisée, lors de la phase conceptuelle, peut avoir un caractère exploratoire, non fini, qui répond aussi aux exigences de l'abstraction et du flou, nécessaires selon plusieurs auteurs au processus de conception architecturale (Goel, 1995; Goldshmidt, 2006). Notons aussi que dans le domaine de l'architecture, notre revue de littérature a relevé peu d'études qui ont permis d'analyser l'apport de la maquette comme outil de conception. Des travaux plus nombreux ont été réalisés en design industriel mais avec des résultats contradictoires tels qu'énumérés par Viswanathan et Linsey (2011). Ainsi, pour Kiriyama et Yamamoto (1998) et Yang (2005), l'utilisation de maquettes dans les domaines académiques et professionnels peut entraîner un effet de fixation et nuire au développement des idées. En revanche, Viswanathan et Linsey (2009) ou Brereton et Megarry (2000) suggèrent que les maquettes constituent de bons supports pour le raisonnement, la communication et la génération des idées. Viswanathan et Linsey (2011) ont réalisé une expérience, en utilisant une méthode qualitative d'analyse de protocoles, auprès d'une quinzaine d'étudiants sénior en design industriel pour tester l'apport des maquettes durant la génération des idées. Leurs conclusions sont que l'utilisation des maquettes peut permettre l'émergence d'idées fonctionnelles et de détecter les erreurs de conception. Les auteurs suggèrent aussi que les maquettes doivent être faciles à réaliser, et comporter peu de détails pour éviter l'effet de fixation. Nos résultats aussi ont montré que concernant la fonctionnalité, les projets réalisés avec la maquette (moyenne= 2,59, médiane=2,75) étaient aussi bons que ceux réalisés avec l'esquisse (moyenne= 2,60, médiane=2,56) et supérieurs à ceux réalisés avec Sketch-Up (moyenne= 2,54, médiane=2,62). D'autres études sont nécessaires pour approfondir ce point.

Cependant, la difficulté économique et technique pour réaliser ces modèles physiques constitue la faiblesse de ce medium. De même, au niveau cognitif, la

maquette a aussi un coût en terme de ressources attentionnelles car, même si l'information est présentée en 3D, des opérations géométriques mentales sont requises particulièrement pour traiter les questions d'échelles entre la représentation mentale et la représentation physique que fournit la maquette

3. Le logiciel Sketch-Up : Il est difficile de comparer les travaux traitant des media numériques à cause de l'éventail disponible des logiciels qui sont utilisés dans la pratique et la recherche. Certaines études font appel à des prototypes de logiciels (Do et al, 2000 ; Aliakseyeu, 2006, Dorta, 2008) ou à des logiciels qui sont déjà obsolètes technologiquement (e.g. Design Apprentice ; Bilda & Demirkan, 2003). La critique récurrente faite aux media numériques, utilisés lors de la phase d'idéation, est le manque d'ambiguïté et d'imprécision qui serait nécessaire à cette phase. En effet, les logiciels proposeraient des formes finies ne laissant guère la place au flou requis. De plus, avec les media numériques, plusieurs procédures sont obligatoires pour créer des formes et des espaces ou pour changer de point de vue (Wojtczuk & Bonnardel, 2011). De plus, le caractère spontané ou naturel de l'esquisse ou de la maquette ne se retrouve pas lors de la manipulation de la souris et du clavier pour interagir avec un logiciel, même si cela a tendance à évoluer avec le développement de technologies tactiles et les tablettes graphiques.

Malgré l'informatisation de la profession, nous pensons que le potentiel des media numériques reste peu exploité, ces media sont surtout utilisés pour améliorer la productivité des concepteurs. De plus, peu d'études se sont consacrées aux réels avantages de ce medium comme outil de conception. La notion d'interactivité est la principale force du numérique. Et en ce sens, le concept de comportement interactif (« interactive behavior »), doit être étudié avec une attention particulière. Ce concept correspond à la manière dont un individu interagit avec une représentation externe ou un medium interactif (Hegarty, 2004). Lorsqu'une représentation interactive est présentée à un individu, celui-ci doit se baser sur ses connaissances pour optimiser l'usage de cette représentation interactive afin de générer des idées. Hegarty, (2004) et Keehner et al. (2008) suggèrent que ces connaissances cognitives

et métacognitives dépendent de plusieurs facteurs internes, comme l'expertise, mais aussi de la complexité de l'information visuelle interactive présentée, des moyens de manipulation de cette représentation externe et du niveau d'interactivité permis. Ainsi, même si les logiciels créent des formes précises et finies, l'espace généré et les représentations peuvent être complexes et floues : « *Although computer tools have no flexibility in constructively interpreting ambiguous representations, they can, however, store and display representations that are ambiguous to people, leaving room for people to interpret them* » (Nakakoji et Yamamoto, 2005, p.518), ce qui selon nous, peut faciliter l'émergence de nouvelles idées pour le concepteur.

Enfin, nous pensons que les stratégies cognitives dépendent du médium utilisé. Peut-être que la notion d'ambiguïté s'applique à l'esquisse mais non aux logiciels. Les concepteurs s'adaptant au médium qu'ils utilisent ; cela expliquerait que la qualité des projets générés n'est pas différente d'un médium à l'autre. Par ailleurs, une autre explication des résultats non significatifs peut être attribuée aux participants eux-mêmes. Comme cela a été rappelé par Prensky (2001) ainsi que Tang et al., (2011), la taxonomie des autochtones numériques (« digital natives ») s'applique à l'échantillon des étudiants en architectures qui a participé à notre travail. En effet, nos participants avaient en moyenne 24,1 ans (avec un écart-type de 3,03) et tous semblent mieux maîtriser sketch-up que l'esquisse. Avec toute la technologie dont ils disposent depuis leur enfance et adolescence, ces participants ont développé des schèmes mentaux et des stratégies cognitives différentes de leurs prédécesseurs. Ainsi il est possible que les résultats des études dans les années 1990 et au début des années 2000, qui ont comparé les media traditionnels versus les media numériques, ne soient plus pertinents compte tenu de l'historique et la culture numériques des participants actuels. Il semble en effet logique que dans le contexte actuel, cette évolution des mœurs du numérique puisse influencer la maîtrise des media de conception et par conséquent du processus de conception.

La conception architecturale est une activité créative complexe. L'utilisation de media d'aide à la conception permet de générer des projets différents selon le médium mais la

qualité de ces projets ne semble pas dépendre de l'outil utilisé. Le contexte, la nature du projet, les facteurs individuels sont autant de paramètres qui influencent et dont il faut tenir compte. Chaque concepteur, en fonction de son expérience, connaissances et stratégies cognitives et métacognitives, doit apprendre à privilégier et choisir le ou les outils pour l'aider dans sa tâche d'idéation, compte tenu de l'évolution de son processus de conception.

La présente recherche a permis de documenter davantage le rôle des media lors du processus de conception architecturale ainsi que la qualité des projets générés. Cette recherche exploratoire a également permis de faire émerger des hypothèses de recherche et des questions méthodologiques, qui seront développés dans le cadre de notre programme de recherche actuel ainsi que dans des travaux futurs.

Bibliographie

- Acuna, A., & Sosa, R. (2010). *The complementary role of representations in Design creativity: sketches and models*. Paper presented at the Design creativity 2010, Japan.
- Adanez, G., & Velasco, A. (2002). Predicting academic success of engineering students in technical drawing from visualization test score. *Journal of Geometry and Graphics*, 6(1), 99-109.
- Aldebert, B., & Rouzies, A. (2010). *L'utilisation des méthodes mixtes dans la recherche française en stratégie : constats et pistes d'amélioration*. Paper presented at the XXIème conférence de l'AIMS, Nantes.
- 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.
- Amabile, T. M. (1983). *The Social Psychology of Creativity*. New York: Springer-Verlag.
- Amabile, T. M. (1996). *Creativity in context*. Boulder, Colo.: Westview Press.
- Anderson, R. E. Hellstrup., T. (1993). Multiple perspectives on discovery and creativity in mind and on paper. In B. Roskos-Ewolson (Ed.), *Imagery, Creativity and Discovery: A cognitive Perspective* Amsterdam: Elsevier.
- Asimov, M. (1962). *Introduction to Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Ataman, O., & Bermudez, J. (1999). *ACADIA 1999: The last Conference of this Century*. Paper presented at the ACADIA1999, Salt Lake City.
- Athavankar, U. (1997). Mental imagery as a design tool. *Cybernetics and Systems*, 28, 25-47.
- Atkinson, R., & Shiffrin, R. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. S. a. J. Spence (Ed.), *he Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory* (Vol. 2, pp. 89-195). New York: Academic Press.
- Baccino, T., Colombi, T. (2000). *L'analyse des mouvements des yeux sur le web*. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 14(1-2), 127-148.
- Baccino, T., & Colombi, T. (2000). L'analyse des mouvements des yeux sur le web. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 14(1-2), 127-148.
- Baddeley, A. D. (1976). *The psychology of memory*. New York: Basic Books.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford
- Baddeley, A. D. (1993). *La mémoire humaine : théorie et pratique*. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble.
- Baddeley, A. D. (2007). *Working memory, thought, and action*. Oxford ; New York: Oxford University Press.

- Baer, J., Kaufman, J. C., & Gentile, C. A. . (2004). Extension of the consensual assessment technique to nonparallel creative products. *Creativity Research Journal*, 16, 113-117.
- Baer, J., & Kaufman, J. C. (2006). *Creativity and reason in cognitive development*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- Bertel, S., Barkowsky, T., Bilda, Z. (2006). Constructing and understanding visuo-spatial representations in design thinking. In S. B. T. Barkowsky, J. Jupp, Z. Bilda (Ed.), *Workshop notes VSDESIGN'06* (pp. 5–9).
- Bertol, D., & Foell, D. (1997). *Designing digital space : an architect's guide to virtual reality*. New York: Wiley.
- Bilda, Z. (2006). *The role of mental imagery in conceptual designing*. PhD, University of Sydney, Sydney.
- 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. S. (2007). The impact of working memory limitations on the design process during conceptualization. *DESIGN STUDIES*, 28(4), 343-367. doi: 10.1016/j.destud.2007.02.005
- Bilda, Z., Gero, J. S., & Purcell, T. (2006). To sketch or not to sketch? That is the question. *Design Studies*, 27(5), 587-613.
- Blasko, D., Holliday-Darr, K. (1999). *Engineering and psychology: Joint project on visualization and engineering*. Paper presented at the meeting of the American Society for Engineering Educators North Central Section, Erie, PA. .
- Boden, M. A. (1994). Creativity: A framework for research. *Behavioural and Brain Sciences*, 17(3), 538-556.
- Bonnardel, N. (2002). Entrée: Créativité. In G. Tiberghien (Ed.), *Dictionnaire des Sciences Cognitives*: Armand Colin/VUEF.
- Bonnardel, N., & Marmèche, E. (2005). *Favouring creativity in design projects: challenges and findings of experimental studies*. Paper presented at the Studying Designers, Sydney.
- Bonnardel, N. (2006). *Créativité et conception : approches cognitives et ergonomiques*. Marseille: Solal.
- 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, 5-22.
- Bonnardel, N., & Piolat, A. (2003). Design activities: how to analyze cognitive effort associated to cognitive treatments? . *International Journal of Cognitive Technology*, 8(1), 4-13.
- Borillo, M. (2005). *Approches cognitives de la création artistique*. Sprimont, Belgique: Mardaga.
- Milton Keynes [England]: Oxford University Press ;
- Brandt, S. A., Stark, L. W. (1997). Spontaneous eye movements during visual imagery reflect the content of the visual scene. *Journal of Cognitive*

- Neuroscience*, 9, 27-38.
- Brereton, M., & McGarry, B. (2000). *An Observational Study of How Objects Support Engineering Design Thinking and Communication: Implications for the design of tangible media*. Paper presented at the CHI '00 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems
- Broadbent, G. (1966). *Design in Architecture*. New York: John Wiley.
- Broek, J. J., Sleijffers, W., & Horvath, I. (2001). *Using Physical Models in Design*. Delft: Dept. of Design engineering, Delft Univ. of Technology.
- Bucciarelli, L. L. (2002). Between thought and object in engineering design. *Design Studies*, 23(3), 219-231.
- Burkhardt, J.-M. (2007). Immersion, représentation et collaboration : discussion et perspectives empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica*, 45(59-87).
- Burkhardt, J.-M., Détienne, F., Moutsinga-Mpaga, L., Perron, L., Leclercq, P., & Safin, S. (2008). *Conception architecturale collaborative avec un « bureau augmenté » : une étude exploratoire de l'effet de la distance et de la co-localisation*. Paper presented at the 43e Congrès de la SELF, Ajaccio.
- Burkhardt, J. M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66(65-91).
- Cantin, V. (2009). *Comportements oculaires et charge cognitive des conducteurs jeunes et âgés*. Doctorat, Université Laval, Québec.
- Carbon, C. C., Leder, H. . (2005). The Repeated Evaluation Technique (RET). A Method to Capture Dynamic Effects of Innovativeness and Attractiveness. *Applied Cognitive Psychology*, 19, 587-601.
- Cardella, M. E., Atman, C. J., & Adams, R. S. (2006). Mapping between design activities and external representations for engineering student designers. *Design Studies*, 27(1), 5-24.
- Carroll, J. B. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor analytic abilities*. New York: Cambridge University Press.
- Casakin, H. (2008). Factors of Design Problem-Solving and their Contribution to Creativity. *Open House International*, 33(1), 46-60.
- Casakin, H. P., & Kreitler, S. (2005). *The nature of creativity8.in design: Factors for assessing individual creativity*. Paper presented at the InternationalWorkshop on Studying Designers, Sydney.
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: towards theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40(4), 988-1000.
- Chai, K.-H., & Xiao, X. (2012). Understanding design research: A bibliometric analysis of Design Studies (1996,Äi2010). *DESIGN STUDIES*, 33(1), 24-43. doi: 10.1016/j.destud.2011.06.004
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive*. Paris: A. Colin.
- Clark, H. (1916). Visual imagery and attention: an analytical study. *American Journal of Psychology*, 27(4), 461-492.

- Cohen, C. A., & Hegarty, M. (2007). Individual differences in use of an external visualization while performing an internal visualization task. *Applied Cognitive Psychology*, 21, 701-711.
- Conan, M. (1990). *Concevoir un projet d'architecture : convention CSTB/Plan construction no 87 61 434*. Paris: L'Harmattan.
- Costermans, J. (2001). *Les activités cognitives : raisonnement, décision et résolution des problèmes* (2e éd. -- ed.). Bruxelles: De Boeck Université.
- Côté, P., Mohamed-Ahmed, A., Tremblay, S. et Dorta, T. (2008). *Towards a quantitative method for evaluating architectural media impact on ideation*. Paper presented at the Third international conference on design computing and cognition, Atlanta.
- Côté, P., Mohamed-Ahmed, A., Tremblay, S. (2011). *A quantitative method to compare the impact of design mediums on the architectural ideation process*. Paper presented at the CAAD Futures 2011, Liège.
- Couronné, T. (2007). *De la prise d'information visuelle à la formation d'impressions : apports de l'oculométrie pour l'étude des processus de la perception et de la cognition visuelle des objets manufacturés*. Doctorat, UNIVERSITE GRENOBLE I – JOSEPH FOURIER, Grenoble.
- Couvreur, A., & Lehuède, F. (2002). Essai de comparaison de méthodes quantitatives et qualitatives à partir d'un exemple : le passage à l'Euro vécu par les consommateurs. *Cahier de Recherche*, 176.
- Creswell, J. W., Plano Clark, V. L., Gutmann, M., Hanson, W. (2003). Advanced mixed methods research designs. In A. T. C. Teddlie (Ed.), *Handbook of mixed methods in social and behavioral research* (pp. 209-240). CA: Thousand Oaks: Sage.
- Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2010). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (2ième ed.). Thousand Oaks: Sage.
- Croize, A.-C. (2001). *Analyse des dynamiques spatio-temporelles des processus de mémoire de travail: Apport de la meg et de l'eeg*. Paper presented at the Proceeding of the École pratique MEG/EEG de l'Hôpital Pitié-Salpêtrière, Paris.
- Cross, N. (2005). Comprendre la pensée du concepteur. In M. Borillo & J.P.Goulette (Eds.), *Cognition et création: explorations cognitives des processus de conception*. Sprimont: Mardaga.
- Cross, N. (2007). Forty years of design research. *Design Studies*, 28(1), 1-4.
- Cross, N. (2007). *Designerly ways of knowing*. London: Springer.
- Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity : flow and the psychology of discovery and invention* (1st -- ed.). New York: HarperCollinsPublishers.
- Csikszentmihalyi, M. (2006). *La créativité : psychologie de la découverte et de l'invention*. Paris: Laffont.
- D'Souza, N., Yoon, S.-Y., & Islam, Z. (2011). Understanding design skills of the Generation Y: An exploration through the VR-KiDS project. *DESIGN STUDIES*, 32(2), 180-209.

- Dancey, C. P., & Reidy, J. (2007). *Satistiques sans maths pour psychologues* (N. Gauvrit, Trans.). Bruxelles: de boeck.
- Darken, R. P., & Petterson, J. (2002). Spatial Orientation and Wayfinding in Large-Scale Virtual Spaces II. *Presence*, 8(6).
- Darses, F., Détienne, F., & Visser, W. (2004). Les activités de conception et leur assistance. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 405-420). Paris: PUF.
- De Waard, D. (1996). *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. PhD University of Groningen.
- Decortis, F., Safin, S. & Leclercq, P. (2005). *A Role for External Representations in Architectural Design? The Influence of a Virtual Desk and an Early 3D View on the Design Activity*. Paper presented at the International Workshop on Understanding designers'05, Aix en Provence.
- Demirkan, H., & Afacan, Y. (2012). Assessing creativity in design education: Analysis of creativity factors in the first-year design studio. *Design Studies*, 33(3), 262-278.
- Denis, M. (1989). *Image et cognition* (1ère éd. -- ed.). Paris: Presses universitaires de France.
- Détienne, F. (2001). *Software Design : Cognitive aspects*. Londre: Springer Verlag.
- Do, E. (2005). Design Sketches and Sketch Design Tools. *Knowledge Based Systems* 18, 383-405.
- Do, E. Y.-L., Gross, M. D., Neiman, B., & Zimring, C. (2000). Intentions in and relations among design drawings. *Design Studies*, 21(5), 483-503.
- Dodge, R. (1900). Visual perception during eye movements. *Psychological review*, 7, 454-465.
- Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: co-evolution of problem-solution. *Design Studies*, 22(5), 425-437.
- Dorst, K., & Dijkhuis, J. (1995). Comparing paradigms for describing design activity. *Design Studies*, 16(2), 261-274.
- Dorta, T. (2001). *L'influence de la réalité virtuelle non-immersive comme outil de visualisation sur le processus de design*. PhD, Université de Montréal, Montréal.
- Dorta, T. (2007). *Ideation and Design Flow through the Hybrid Ideation Space*. Paper presented at the Communication in the Visual Society, SIGRADI 2007, Mexico.
- Dorta, T., Pérez, E. et Lesage, A. (2008). The Ideation Gap: Hybrid tools, Design flow and Practice *Design Studies*, 29(2), 121-141.
- Dreyfus, S. E., & Dreyfus, H. L. (1980). *A Five-Stage Model of the Mental Activities Involved in Directed Skill Acquisition*. Washington: Storming Media.
- Eastman, C. (2001). New Directions in Design Cognition: Studies of Representation and Recall. In W. N. C. Eastman, M. McCracken eds (Ed.), *Design Knowing and Learning: Cognition in Design Education*: Elsevier Science Press.
- Eggemeier, F. T. (1988). Properties of workload assessment techniques. In P. A.

- Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (pp. 41-62). Amsterdam.
- Ekstrom, R., French, J., Harman, H. & Dermen, D. (1976). *Kit of factor-referenced cognitive tests*. Pinceton: Educational Testing Service.
- Endsley, R. C., & Bradbard, M. R. (1981). *Quality day care : a handbook of choices for parents and caregivers*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Endsley, W. R. (1980). *Peer tutorial instruction*. Englewood Cliffs, N.J.: Educational Technology Publications.
- Ericsson, K. A., & Delaney, P. F. (1998). Working memory and expert performance,. In R. L. a. K. Gilhooly (Ed.), *Working Memory and Thinking* (pp. 93-114). U.K: Psychology Press.
- Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: Verbal reports as data*. Cambridge: MIT Press.
- Ericsson, K. A., & Smith, J. (1991). *Toward a General Theory of Expertise: Prospects and Limits*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Falzon, P. (2004). *Ergonomie*. Paris: Presses universitaires de France.
- Farmer, E., & Brownson, A. (2003). Review of Workload Measurement, Analysis and Interpretation Method: European organisation for the safety of air navigation.
- Fernandez, P. (2002). Approches méthodologiques et modes opératoires dans le processus de conception architecturale. In J. P. G. M. Borillo (Ed.), *Cognition et création. Explorations cognitives des processus de conception.*: Mardaga.
- Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative cognition : theory, research, and applications*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Fortin, C., & Rousseau, R. (1993). *Psychologie cognitive : une approche de traitement de l'information*. Sainte-Foy: Télé-université : Presses de l'Université du Québec.
- Furness, T. A. (1987). Designing in Virtual Space. In W. B. R. a. K. R. Boff (Ed.), *System Design: Behavioral Perspectives on Designers, Tools, and Organization* (pp. 127-143). New York: North-Holland.
- Gallina, J.-M. (2006). *Les représentations mentales*. Paris: Dunod.
- Gardner, H. (1993). *Multiple intelligences : the theory in practice*. New York: Basic Books.
- Gero, J. S. (1996). Creativity, emergence and evolution in design: concepts and framework. *Knowledge-Based Systems*, 9(7), 435-448.
- Gero, J. S. (2007). AI EDAM at 20: Artificial intelligence in designing. *AIEDAM* 21(1), 17-18.
- Giordano, Y. (2003). *Conduire un projet de recherche : une perspective qualitative*. Colombelles: EMS.
- Goel, V. (1995). *Sketches of Thought*. Cambridge MA: MIT Press.
- Göker, M. H. (1997). The effects of experience during design problem solving. *Design Studies*, 17, 341-361.

- Goldberg, J. H., and Kotval, X.P. (1998). Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of industrial Ergonomics*, 24, 631-645.
- Goldberg, J. H., & Schryver, J. C. (1995). Eye-Gaze Contingent Control of the Computer Interface: Methodology and Example for Zoom Detection. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 27(3), 338-350.
- Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal*, 4(2), 123-143.
- Goldschmidt, G. (1995). The designer as a team of one. *Design Studies*, 16(2), 189-209.
- Goldthwait, C. (1933). Relation of eye movements to visual imagery. *American Journal of Psychology*.
- Guéguen, N. (2007). *Méthodologie en psychologie*. Paris: Dunod.
- Guilford, J. P. (1968). *Intelligence, creativity, and their educational implications*. San Diego, Calif.,: R. R. Knapp.
- Halin, G. (2004). *Modèles et outils pour l'assistance à la conception Application à la conception architecturale* Habilitation à Diriger des Recherches Institut National Polytechnique de Lorraine
- Hammer, N., Lengyel, S. . (1991). *Identifying Semantics Markers in Design Products: The Use of Eye- Movement recording in Industrial Design*. B.V. (North-Holland): Elsevier Science Publishers.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. In P. A. H. a. N. Meshkati (Ed.), *Human Mental Workload* (pp. 139-183). Amsterdam: North-Holland.
- Hebb, D. O. (1968). Concerning imagery. *Psychological Review*, 75, 466-477.
- Hecker, R., & Mapperson, B. (1997). Dissociation of visual and spatial processing in working memory. *Neuropsychologia*, 35(5), 599-603.
- Hegarty, M. (2004). Dynamic visualizations and learning: Getting to the difficult questions. *Learning and Instruction*, 14, 343-351.
- Hegarty, M., Kriz, S., & Cate, C. (2003). The Roles of Mental Animations and External Animations in Understanding Mechanical Systems. *Cognition and Instruction*, 21(4), 209-249.
- Hegarty, M., & Waller, D. (2006). Individual differences in spatial abilities. In P. S. A. Miyake (Ed.), *Handbook of Visuospatial Thinking*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hennessey, B. A. (1994). The consensual assessment technique: An examination of the relationship between ratings of product and process creativity. *Creativity Research Journal*, 7(2), 193-208.
- Hennessey, B. A. (2003). The Social Psychology of Creativity. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 47(3), 253-271. doi: 10.1080/00313830308601
- Hill, S. G., Iavecchia, H. P., Byers, J. C., Bittner, A. C., Zaklad, A. L., & Christ, R. E.

- (1992). Comparison of four subjective workload rating scales. *Human Factors*, 34, 429-439.
- Ho, C.-H. (2006). *Spatial Cognition in Design*. PhD, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Hornecker, E. (2007). *Sketches, Drawings, Diagrams, Physical Models, Prototypes, and Gesture as Representational Forms*. Paper presented at the Second Workshop on Physicality, Lancaster.
- Howard T.J., C. S. J., Dekoninck E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*, 29(2), 160-180.
- Humphrey, K., & Underwood, G. (2008). Fixation sequences in imagery and in recognition during the processing of pictures of real-world scenes. *Journal of Eye Movement Research*, 2(2), 1-15.
- Huot, S. (2005). *Une nouvelle approche pour la conception créative : De l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions non-standard*. Doctorat, Nantes, Nantes.
- Idi, D. B., Khaidzir, K. A. B. M., & Zeari, F. (2011). Paper presented at the 2nd International Conference on Construction and Project Management, Singapore.
- Iordanova, I. (2009). *Assistance de l'enseignement de la conception architecturale par la modélisation de savoir-faire des référents*. Doctorat, Université de Montréal, Montréal.
- Ishai, A., & Sagi, D. (1995). Common Mechanisms of Visual Imagery and Perception. *Science*, 268, 1772-1774.
- Janson, B. (2005). Design ideation: the conceptual sketch in the digital age. *DESIGN STUDIES*, 26(6), 613 - 624.
- Jin, Y., & Chusilp, P. (2006). Study of mental iteration in different design situations. *Design Studies*, 27(1), 25-55.
- Johansson R, Holsanova J, & Holmqvist K. (2005). *What Do Eye Movements Reveal About Mental Imagery? Evidence From Visual And Verbal Elicitations*. Paper presented at the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society.
- Johansson R, Holsanova J, & Holmqvist K. (2006). Pictures and spoken descriptions elicit similar eye movements during mental imagery, both in light and in complete darkness. *Cognitive Science*, 6(30), 1053-1079.
- Johnson, R. B., & Onwuegbuzie, A. J. (2004). Mixed Methods Research : A Research Paradigm Whose Time Has Come. *Educational Researcher*, 33, 14-26.
- Kalay, Y. E. (2004). *Architecture's new media : principles, theories, and methods of computer-aided design*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Karam, H. (2010). *L'abduction en conception architecturale : Une sémiologie hypostatique*. PhD, Université Laval, Québec.
- Kan, J. W. T., & Gero, J. S. (2007). *Can an objective measurement of design*

- protocols reflect the quality of a design outcome?* Paper presented at the ICED07, Ecole Centrale de Paris.
- Karsenti, T. (2006). Pragmatisme et méthodologie de recherche en sciences de l'éducation : passons à la version 3.0. *Formation et Profession*, 13(1), 2-5.
- Karsenti, T., & Savoie-Zajc, L. (2000). *Introduction à la recherche en éducation*. Sherbrooke: Éditions du CRP.
- Kaufman, J. C., Baer, J., Cole, J. C., & Sexton, J. D. (2008). A comparison of expert and nonexpert raters using the consensual assessment technique. [Article]. *Creativity Research Journal*, 20(2), 171-178.
- Kavakli, M., & Gero, J. S. (2001). Sketching as mental imagery processing. *Design Studies*, 22(4), 347-364.
- Kavakli, M., & Gero, J. S. (2003). Difference between expert and novice designers: an experimental study. In U. Lindemann (Ed.), *Human Behaviour in Design* (pp. 42-51): Springer.
- Keehner, M., Khooshabeh, P., & Hegarty, M. (2004). Interactive visualizations and individual differences among users. In G. G. F. Dong, & S. Y. Chen (Ed.), *User Centered Design for Medical Visualization*. Hershey, PA: Idea Group Inc.
- Keehner, M. H., M., Cohen, C. A., Khooshabeh, P. & Montello, D. R. (2008). Spatial reasoning with external visualizations: What matters is what you see, not whether you interact. *Cognitive Science*, 32, 1099-1132.
- Kim, M. J., & Maher, M. L. (2008). The Impact of Tangible User Interfaces on Designers' Spatial Cognition. *Human-Computer Interaction*, 23(2), 101-137.
- Kiryama, T., and Yamamoto, T.,. (1998). Strategic Knowledge Acquisition: A Case Study of Learning through Prototyping. *Knowledge-based Systems*, 11(7-8), 399-404.
- Klingner, J., Kumar, R., and Hanrahan, P. (2008). *Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker*. Paper presented at the Eye Tracking Research and Applications Symposium, Savannah, Georgia.
- Knight, M., Dokonal, W., Brown, A., & Hannibal, C. (2005). *Contemporary Digital Techniques in the Early Stages of Design*. Paper presented at the CAAD Futures 2005, Vienna.
- Koivunen, K., Kukkonen, S., Lahtinen, S., Rantala, H., Sharmin, S. . (2004). *Towards Deeper Understanding of How People Perceive Design in Products*. Paper presented at the CADE2004 Web Proceedings of Computers in Art and Design Education Conference.
- Kokotovich, V., & Purcell, T. (2000). Mental synthesis and creativity in design: an experimental examination. *Design Studies*, 21(5), 437-449.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Elements of graph design*. New York: W. H. Freeman.
- Laeng, B., and Teodorescu, D.-S. (2002). Eye scanpaths during visual imagery reenact those of perception of the same visual scene. *Cognitive Science*, 26, 207-231.

- Lajoie, S. (2003). Individual differences in spatial ability: developing technologies to increase strategy awareness and skill. *Educational Psychologist*, 38(2), 115-125.
- Lameyre, X. (1993). *L'imagerie mentale*. Paris: Presses universitaires de France.
- Lawson, B. (2005). *How Designers Think : The Design Process Demystified* (4 ed.): Architectural Press.
- Lawson, B., & Dorst, K. (2009). *Design Expertise*. Oxford: Architectural Press.
- Lean, G., & Clements, M.A. (1981). Spatial ability, visual imagery, and mathematical performance. *Educational Studies in Mathematics*, 12(3), 267-299.
- Lebahar, J.-C. (1994). *Le design industriel : sémiologie de la séduction et code de la matière*. Marseille: Parenthèses.
- Lebahar, J.-C. (2007). *La conception en design industriel et en architecture : désir, pertinence, coopération et cognition*. Paris: Lavoisier.
- Lebahar, J. C. (2005). *L'activité cognitive du sujet-concepteur*. Paper presented at the "Le design en question(s)", Centre Pompidou, Paris.
- Leech, N. L., Barrett, K. C., & Morgan, G. A. (2008). *SPSS for intermediate statistics : use and interpretation*. New York: Lawrence Erlbaum.
- Lennings, A. F., Broek, J. J., Horvath, I., Sleijffers, W., & de Smit, A. (2001). Editable Physical models for conceptual design. Delft: Delft University of Technology, Sub-faculty of Industrial Design Engineering, ICA research group.
- Linn, M. C. & Petterson, A. C. (1985). Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child Development*, 56(6), 1479-1498.
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove: L. Erlbaum.
- Logie, R. H., & Pearson, D. G. (1997). The inner eye and the inner scribe of visuo-spatial working memory: evidence from developmental fractionation. *European Journal of Cognitive Psychology and Aging*, 9(3), 241-257.
- Lohman, D. F. (1988). Spatial abilities as traits, processes, and knowledge. In R. J. & J. C. K. R. J. Sternberg (Eds.), *Advances in the psychology of human intelligence* (Vol. 40, pp. 181-248). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Lubart, T. (1995). How can computers be partners in the creative process: Classification and commentary on the Special Issue. *International Journal of Human-Computer Studies*, 63(4-5), 365-369.
- Lubart, T. I. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris: Colin.
- Madrazo, L. (1999). Types and Instances: a paradigm for teaching design with computers. *Design Studies*, 20(2), 177-193.
- Mark, M. M., & Shotland, R. L. (Eds.). (1987). *Multiple methods in program evaluation. New Directions for Program Evaluation* (Vol. 35). San Francisco: Jossey-Bass.
- Marx, J. (2000). A proposal for alternative methods for teaching digital design. *Automation in Construction*, 9, 19-35.

- Masayushi, N., Mayumi, H., & Teijun, M. (2007). Relationship between Image Gaze Location and Fractal Dimension. *IEEE*, 4014-4018.
- Mast, F. W., & Kosslyn, S. M. (2002). Eye movements during visual mental imagery. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(7), 271-272.
- Matlin, M. W. (2001). *La cognition : une introduction à la psychologie cognitive* (1re éd. -- ed.). [Bruxelles]: De Boeck Université.
- McNeil, T., Gero, J. S., & Warren, J. (1998). Understanding conceptual electronic design using protocol analysis. *Research in Engineering Design*, 10, 129-140.
- Meneely, J., & Portillo, M. (2005). The Adaptable Mind in Design: Relating Personality, Cognitive Style, and Creative Performance. *Creativity Research Journal*, 17(2-3), 155-166. doi: 10.1080/10400419.2005.9651476
- Menezes, A., & Lawson, B. (2006). How designers perceive sketches. *DESIGN STUDIES*, 27(5), 571-585. doi: 10.1016/j.destud.2006.02.001
- Miyake, S. (2001). Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures. *Int. J. of Psychophysiology*, 40, 233-238.
- Miyake, S., Takuro, S., Yasuhiko, T., Nobuyuki, K., & Tomohiro, Y. . (2007). *Multidimensional evaluation of human responses to the workload*. Paper presented at the EPCE'07 Proceedings of the 7th international conference on Engineering psychology and cognitive ergonomics.
- Mohamed-Ahmed, A., & Côté, P. (2007). *Impact of Exploration Mode on Spatial Knowledge Acquisition in Non-immersive 3D Virtual Environments*. Paper presented at the Europa, 11th International Conference on Design Sciences and Technology, Montréal.
- Moss, P. A. (1996). Enlarging the dialogue in educational measurement: Voices from interpretive research traditions. *Educational Researcher*, 25, 20-28.
- Mougenot, C. (2008). *Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée*. Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris.
- Newell, A. (1968). On the analysis of human problem solving protocols. In J. C. G. a. B. Jaulin (Ed.), *Calcul et formalisation dans les sciences de l'homme*, . Paris: Centre National de la Recherche Scientifique.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Norton, D., & Stark, L. W. (1971). Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns. *Vision research*, 11, 929-942.
- O'Donnell, R. D., & Eggemeier, F. T. (1986). Workload assessment methodology. . In L. K. a. J. P. T. K.R. Boff (Ed.), *Handbook of Perception and Human Performance. Volume 2. Cognitive Processes and Performance*: John Wiley and Sons.
- Olive, T. (1997). Validité de la méthode de temps de réaction avec rétrospection dirigée pour étudier la rédaction de textes. *Cognito Informations*, 7, 21-30.
- Oxman, R. (2001). The Mind in Design - A Conceptual Framework for Cognition in

- Design Education. In W. M. M. a. W. N. C. Eastman (Ed.), *Knowing and Learning to Design: Cognition in Design Education*. Oxford: Elsevier.
- Pahl, G., & Beitz, W. (1988). *Engineering Design: A systematic approach*: Springer.
- Paillé, P., & Mucchielli, A. (2003). *L'analyse qualitative en sciences humaines et sociales*. Paris: Armand Colin.
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York,: Holt Rinehart and Winston.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations : a dual coding approach*. New YorkOxford: Oxford University Press ;
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size as an indication of affective processing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(185-198).
- Picariello, M. L. (1994). *Children's perception of autonomy in the classroom*. Phd, Brandeis, Waltham.
- Plucker, J. A., & Makel, M. C. (2010). Assessment of creativity. In J. C. K. R. J. Sternberg (Ed.), *The Cambridge Handbook of Creativity* (pp. 48-73). Cambridge: Cambridge University Press.
- Potter, C., & van der Merwe, E. (2001). *Spatial ability, visual imagery and academic performance in engineering graphics*. . Paper presented at the International Conference on Engineering Education, Oslo, Norway.
- Pour Rahimian, F., & Ibrahim, R. (2008). Ethnography report for developing VR supportive environment, (Vol. FRSB/EDI/TR1): Faculty of Design and Architecture, Universiti Putra Malaysia.
- Prensky, M. (2001a). Digital natives, digital immigrants Part 1. *On the Horizon*, 9(5), 1-6.
- Prensky, M. (2001b). Digital natives, digital immigrants Part2: Do they really think differently? *On the Horizon*, 9(6), 1-6.
- Prost, R. (1992). *Conception architecturale : une investigation méthodologique*. Paris: L'Harmattan.
- Purcell, T., & Gero, J. S. (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(4), 389-430.
- Pylyshyn, Z. W. (2003). Mental imagery: in search of a theory. *Behav.Brain Sci.*, 25, 157-237.
- Rahimian, F. P., & Ibrahim, R. (2011). Impacts of VR 3D sketching on novice designers,Â spatial cognition in collaborative conceptual architectural design. *DESIGN STUDIES*, 32(3), 255-291. doi: 10.1016/j.destud.2010.10.003
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering*. New York: North-Holland.
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. . (1988). he subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In P. A. H. N. Meshkati (Ed.), *Human mental workload*. Amsterdam: Elsevier.

- Renaud, P., Chartier, S., Albert, G., Décarie, J., Cournoyer, L. G., & Bouchard, S. (2007). Presence as Determined by Fractal Perceptual-Motor Dynamics. *Cyberpsychology & Behavior*, *10*(1), 122-130.
- Rhodes, M. (1961). An analysis of creativity. *Phi Delta Kappan*, *42*, 305-310.
- Richardson, D. C., & Spivey, M. (2004). Eye tracking: Research areas and applications. In G. W. G. B. (Eds.) (Ed.), *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering*. NY: Marcel Dekker, Inc.
- Riding, R. J. R., S. (1998). *Cognitive styles and learning strategies: Understanding style differences in learning and behaviour*. Londres: David Fulton Publishers.
- Rittel, H., & Webber, M. (1973). Dilemma in a general theory of planning. *Policy Sciences*, *4*, 155-160.
- Roberts, A. (2006). Cognitive styles and student progression in architectural design education. *Design Studies*, *27*, 167-181.
- Römer, A., Pache, M., Weisshahn, G., Lindemann, U., & Hacker, W. (2001). Effort-saving product representations in design—results of a questionnaire survey. *Design Studies*, *22*, 473-491.
- Rosenman, M. A., & Gero, J. S. (1998). Purpose and function in design. *Design Studies*, *19*(2), 161-186.
- Runco, M. A., & Pritzker, S. R. (2011). *Encyclopedia of creativity* (2nd ed.). Amsterdam ; Boston: Academic Press/Elsevier.
- Saariluoma, P. (1998). Adversary problem solving and working memory. In R. L. a. K. Gilhooly (Ed.), *Working Memory and Thinking* (pp. 115-138). East Sussex: Psychology Press.
- Salthouse, T. A. (1991). Age and experience effects on the implementation of orthographic drawings of three-dimensional objects. *Psychology and Aging*, *6*(3), 426-433.
- Sarkar, P., & Chakrabarti, A. (2008). Studying engineering design creativity—developing a common definition and associated measures. In J. Gero (Ed.), *Studying Design Creativity*: Springer Verlag.
- Sarkar, P., & Chakrabarti, A. (2011). Assessing design creativity. *DESIGN STUDIES*, *32*(4), 348-383. doi: 10.1016/j.destud.2011.01.002
- Scali, S., Shillito, A. M., & Wright, M. (2002). *Thinking in space: concept physical models and the call for new digital tools*. Paper presented at the 'Crafts in the 20th Century, Edinburgh.
- Schön, D. A. (1987). *Educating the reflective practitioner : [toward a new design for teaching and learning in the professions]* (1st ed.). San Francisco: Jossey-Bass.
- Shah, J. J., & Vargas-Hernandez, N. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies*, *24*(2), 111-134.
- Shah, P., & Miyake, A. (2005). *The Cambridge handbook of visuospatial thinking*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Shepard, R., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects.

- Science*, 171(972), 701-713.
- Shireen, N., Erhan, H., Sanchez, R., Popovic, J., Riecke, B., & Woodbury, R. (2011). *Design Space Exploration in Parametric System: Analyzing Effects of Goal Specificity and Method Specificity on Design Solutions*. Paper presented at the ACM Creativity & Cognition, Atlanta.
- Silva Neves, R. d. (1999). *Psychologie cognitive*. Paris: A. Colin.
- Simon, H. A. (1974). *La science des systèmes, science de l'artificiel*. Paris: Épi.
- Simon, H. A. (2004). *Les sciences de l'artificiel*. Paris: Gallimard.
- Simonton, D. (1995). *Creative expertise: A life-span developmental perspective*. Paper presented at the Acquisition of expert performance: An international conference., Wakulla Springs.
- Smith, E. E., Jonides, J., Koeppe, R. A., Awh, E., Schumacher, E. H., & Minoshima, S. (1995). Spatial vs. object working memory: PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(337-356).
- Sockeel, P., & Anceaux, F. (2008). *La démarche expérimentale en psychologie* (seconde ed.). Paris: IN PRESS.
- Sorby, S. (2006). *Developing 3-D spatial skills for engineering student*. Paper presented at the Australasian Association of Engineering Education Conference, Auckland University of Technology, New Zealand. .
- Spearman, C., & Wynn Jones, L. L. ((1950). *Human ability*. London: MacMillan.
- Sperandio, J.-C. (1984). *L'ergonomie du travail mental*. Paris: PUF.
- Stern, J. A. (1993). The eyes : Reflector of attentional processes. *CSERIAC Gateway*, 4, 7-12.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1996). Investing in creativity. *American Psychologist*, 51(7), 677-688.
- Sternberg, R. J., Grigorenko, E., & Singer, J. L. (2004). *Creativity : from potential to realization* (1st ed.). Washington, DC: American Psychological Association.
- Sternberg, R. J., & Kaufman, J. C. (2010). *The Cambridge handbook of creativity*. New York: Cambridge University Press.
- Stones, C., & Cassidy, T. (2006). Comparing synthesis strategies of novice graphic designers using digital and traditional design tools. *DESIGN STUDIES*, 28(1), 59-72.
- Stoy, E. G. (1930). A preliminary study of ocular attitudes in thinking of spatial relations. *Journal of General Psychology*.
- Sutton, K., & Williams, A. (2006). *Impact of spatial ability on students doing graphics based courses*. Paper presented at the Australasian Association of Engineering Education Conference, Auckland University of Technology, New Zealand.
- Sutton, K., & Williams, A. (2007). *Spatial cognition and its implications for design*. Paper presented at the IASDR'07, Hong-Kong.
- Suwa, M., Gero, J. S. and Purcell, T. (1998). *Analysis of cognitive processes of a designer as the foundation for support tools*. Paper presented at the Artificial Intelligence in Design '98, Kluwer.

- Suwa, M., Tversky, B., Gero, J., et Purcell, T. (2001). Seeing into sketches: Regrouping parts encourages new interpretations. In B. T. a. T. P. J. S. Gero (Ed.), *Visual and spatial reasoning in design, II* (pp. 207-219). Sydney: Key Centre of Design Computing.
- Suwa, M., & Tversky, B. (1997). What do architects and students perceive in their design sketches? A protocol analysis. *Design Studies*, 18(4), 385-403.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. . (1996). *Using multivariate statistics* (3rd ed.). New York: HarperCollins.
- Tang, H. H., Lee, Y. Y., & Gero, J. S. (2011). Comparing collaborative co-located and distributed design processes in digital and traditional sketching environments: A protocol study using the function,Äbehaviour,Ästructure coding scheme. *DESIGN STUDIES*, 32(1), 1-29. doi: 10.1016/j.destud.2010.06.004
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (2003). *Handbook of mixed-methods in social & behavioral research*. Thousand Oaks: Sage.
- Thomas, J. C., & Carroll, J. M. (1979). The psychological study of design. *DESIGN STUDIES*, 1(1), 5-11.
- Thurstone, L. L. (1938). Primary mental abilities. *Psychometric Monographs*, 1.
- Tijus, C. (2001). *Introduction à la psychologie cognitive*. Paris: Nathan.
- Toker, F. (2003). Falling Water Rising: Frank Lloyd Wright. In E. J. Kaufmann (Ed.), *America's Most Extraordinary House*. New York: Knopf.
- Torrance, E. P. (1963). *Creativity*. Washington: Association of Classroom Teachers of the National Education Association.
- Torrance, E. P., Glover, J. A., Ronning, R. R., & Reynolds, C. R. (1989). *Handbook of creativity*. New York: Plenum Press.
- Tricot, A., & Chanquoy, L.(1996). La charge mentale, « vertu dormitive » ou concept opérationnel? Introduction. *Psychologie Française*, 41(4), 313-318.
- Tsang, P. S., & Velazquez, V. L. . (1996). Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings. *Ergonomics*, 39(3), 358-381.
- Tulving, E. (1983). *Elements of episodic memory*. Oxford New York: Clarendon Press ;
- Tungar, M. (2009). *Mental Workload in Personal Information Management: Understanding PIM Practices Across Multiple Devices*. PhD, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Tyndiuk, F. (2005). *Référentiels Spatiaux des Tâches d'Interaction et Caractéristiques de l'Utilisateur influençant la Performance en Réalité Virtuelle*. Doctorat, Université de Bordeaux 2, Bordeaux.
- Ullman, D. G. (2003). *The mechanical design process* (3rd ed.). Boston ; Montreal: McGraw-Hill.
- Vallerand, R. J., & Hess, U. (1999). *Méthodes de recherche en psychologie*. Boucherville, Québec: G. Morin.
- Valléry, G. (2004). Relations de service et approche ergonomique : saisir le caractère dynamique et situé de l'activité au travers de l'analyse des

- science, invention, and the arts*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Wickens, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance*. (2ième ed.): Harper Collins Publisher.
- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Witkin, H. A., Moore, C.A., Oltman, P.K., Goodenough, D.R., Friedman, F., Owen, D.R. & Raskin E. (1977). Role of field dependent and field independent cognitive styles in academic evolution: A longitudinal study. *Journal of Educational Psychology*, 69(3), 197-211.
- Wojtczuk, A., & Bonnardel, N. (2011). Designing and assessing everyday objects: Impact of externalisation tools and judges' backgrounds. *Interacting with Computers*, 23(4), 337-345.
- Won, P. H. (2001). The comparison between visual thinking using computer and conventional media in the concept generation stages in design. *Automation in Construction*, 10, 319-325.
- Woodcock, R. W., McGrew, K.S. & Mather, N. (2001). *Woodcock-Johnson III Tests of Cognitive Abilities*. Itasca: Riverside Publishing.
- Yamamoto, Y., & Nakakoji, K. (2005). Interaction design of tools for fostering creativity in the early stages of information design. *Int. J. Human-Computer Studies*, 63, 513-535.
- Yang, M. C. (2005). A study of prototypes, design activity, and design outcome. *Design Studies*, 26(6), 649-669.
- Yang, M. C., & Epstein, D. J. (2005). A study of prototypes, design activity, and design outcomes. *Design Studies*, 26, 649-669.
- Yarbus, A. L. (1967). Eye movements during perception of complex objects. In L. A. Riggs (Ed.), *Eye movements and vision*. New York: Plenum Press.
- Ye, J., Campbell, R. I., Page, T., & Badni, K. S. (2006). An investigation into the implementation of virtual reality technologies in support of conceptual design. *Design Studies*, 27(1), 77-97.
- Yi-L, D. E., Gross, M., Neiman, B., & Zimring, C. (2000). Intentions in and relations among design drawings. *Design Studies*, 21(5), 483-503.
- Yoon, D., & Narayanan, N. H. (2004). *Mental imagery in problem solving: An eye tracking study*. Paper presented at the Proceedings of the Third ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications.
- Yukhina, E. (2007). *Cognitive Abilities & Learning Styles in Design Processes and Judgements of Architecture Students*. PhD, University Of Sydney, Sydney.
- Yukhina, E. (2008). *Cognitive Studies of Architecture Students*: VDM Verlag & Mueller
- Zeisel, J. (1984). *Inquiry by design : tools for environment-behaviour research*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zeisel, J. (2006). *Inquiry by design : environment/behavior/neuroscience in architecture, interiors, landscape, and planning* (Rev. ed.). New York: W.W. Norton & Company.

Zhang, J., & Norman, D. A. (1994). Representation in distributed cognitive tasks.
Cognitive Science, 18, 87-122.

ANNEXES

ANNEXES 1 : Présentation des projets

PROJET 1 - ESQUISSE

RÉALISATION D'UN ABRIS-BUS

Dans le cadre des travaux d'aménagement des voies réservées au Métrobus 802, la RTC a lancé l'appel d'offre pour la construction de cinq petits terminaux nouvelle génération au coût de 300 000 \$ pour les cinq terminaux.

LA TÂCHE :

Votre tâche consiste à concevoir un abribus-type coin Charest - Marie de l'Incarnation à Québec (voir site page 3). Des exemples/précédents d'abribus sont fournis à la page 2.

L'abribus devra comporter :

- Un système d'affichage des horaires des bus;
- Un banc et une poubelle;
- Un affichage publicitaire.

À REMETTRE :

1 PLAN + 1 ÉLÉVATION + 1 PERSPECTIVE/AXO QUI METTENT EN ÉVIDENCE LA SOLUTION PROPOSÉE

CRITÈRES DE DESIGN À RESPECTER:

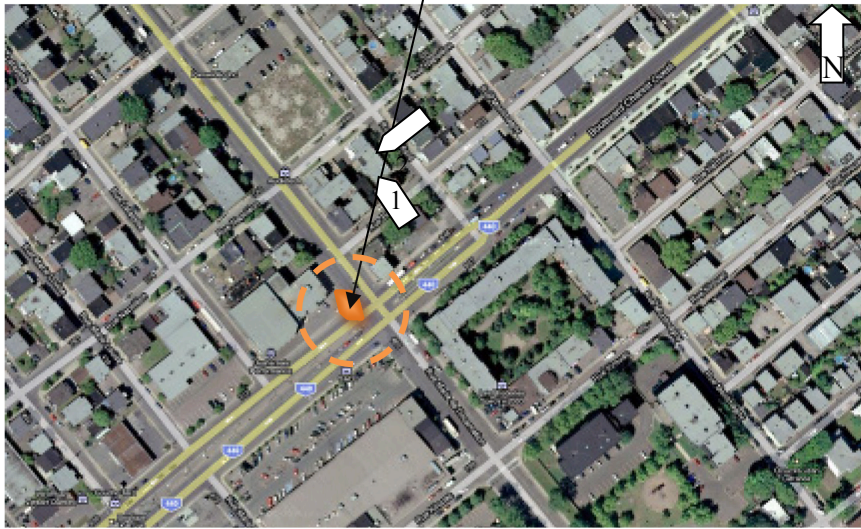
1. Les dimensions/proportions de l'abribus sont approximativement : 3,5 m x 1,5 m x 2,00 m de haut.
2. Trois de ses quatre façades doit être vitrées. Les usagers doivent voir l'arrivée du bus.
3. Prévoir un support pour l'affichage des horaires à l'extérieur de l'abribus.
4. Permettre l'accessibilité universelle.
5. L'affichage publicitaire se fera sur une des façades.
6. L'abribus doit comporter des éléments pour protéger les usagers des intempéries (projection d'eau, pluie, neige)

Exemples d'abribus à Québec :



Site et emplacement :

Emplacement du nouvel abribus



POINT DE VUE 2



PROJET 2 - MAQUETTE

CONSTRUCTION D'UNE STATION VERTE POUR LA COLLECTE DES MATIÈRES RECYCLABLES

Le projet consiste à remplacer dans le stationnement du centre Lucien Borne à Québec (cf. page 3) les bacs de collecte des matières recyclables. Il faudra concevoir une station de collecte des matières recyclables non domestiques.

Cette station verte doit constituer un élément supplémentaire qui permettra d'augmenter les quantités de matières recyclables dans la ville, réduisant ainsi l'enfouissement.

LA TÂCHE :

Il s'agit de concevoir la station verte et les 3 bacs de recyclage qu'elle contient. Chaque bac a une contenance de 500 litres (cf. page 2) et concernera le recyclage des matériaux suivant : livres – vêtements - jouets

À REMETTRE :

- METTRE EN EVIDENCE LA SOLUTION FINALE EN UTILISANT LE MATÉRIEL FOURNI
- PRENDRE 3 PHOTOS : UN PLAN (VUE DE DESSUS) + UNE ELEVATION + 1 PERSPECTIVE

CRITÈRES DE DESIGN

1. Dimensions/proportions approximatives de la station: 6 m x 2,5 m x 3 m de hauteur
2. Les 3 bacs doivent être identifiés différemment.
3. La station doit être ergonomique pour les citoyens (ouverture des bacs à hauteur d'homme).
4. Dimensions/proportions approximatives des bacs (sans roues) : 1m X 1,5m x 1m de hauteur
5. Prévoir des supports pour la manutention afin de faciliter aux collecteurs le vidage des bacs dans le camion de recyclage.
6. Pour les bacs, prévoir une ouverture centrale aux dimensions variables selon l'usage : (livres, linge, jouets)



Exemples de design de bac à recyclage



Exemples de bacs de 500 Litres



Exemples de station verte

Site et emplacement



PROJET 3 – SKETCH-UP

CONSTRUCTION D'UNE TOILETTE PUBLIQUE DANS LE VIEUX QUÉBEC

L'arrondissement historique du Vieux-Québec, classé site du patrimoine mondial de l'UNESCO en 1985, est un lieu hautement touristique qui a reçu en 2007 plus de 3,3 millions de touristes. L'un de ses besoins est essentiel et requiert des aménagements que la Ville n'est pas toujours en mesure de lui offrir, des toilettes publiques. Ce service essentiel paraît avoir été négligé depuis longtemps et l'augmentation continue du taux de fréquentation touristique associée à la forte demande n'arrangera pas la situation si aucune mesure n'est prise.

LA TACHE :

Il s'agit de concevoir une toilette publique automatisée dans le Vieux-Québec (voir site/emplacement à la page 3). Ces toilettes, qui disposent d'un cycle de nettoyage complet et automatique après chaque utilisation, comporteront une toilette pour hommes et une autre pour femmes. Des exemples de toilettes automatisées sont fournis à la page 2.

À REMETTRE :

ENREGISTRER LA SOLUTION FINALE : SUJET XX – SESSION XX – PROJET XX
CRÉER DES IMAGES JPG DU PLAN + 1 ÉLÉVATION + 1 PERSPECTIVE/AXO.

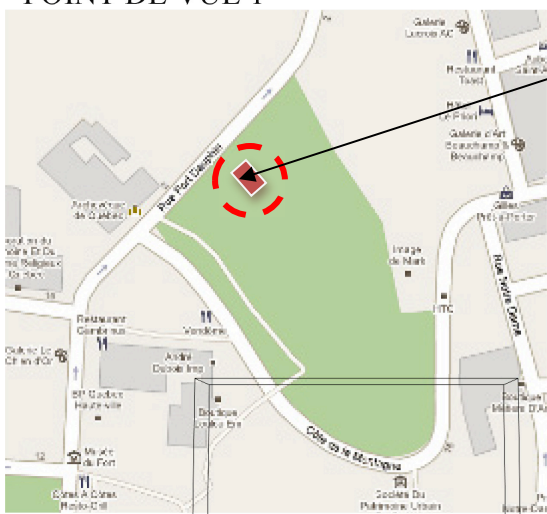
CRITÈRES DE DESIGN À RESPECTER

1. Un élément signalétique doit permettre d'identifier les toilettes
2. Prévoir sur une des façades un panneau d'indications pour le fonctionnement des toilettes
3. Prévoir des éléments architecturaux pour protéger les usagers des intempéries (pluie, neige) pendant l'attente du bus
4. Respecter les dimensions/proportions approximatives des toilettes : 4 m x 2 m x 2.5 m de hauteur
5. Les toilettes comportent 2 portes centrales (pour chaque sexe) sur la même façade (façade qui peut être la même ou différente que le panneau d'indications)
6. Une fontaine d'eau doit être installée sur la même façade que le panneau d'indication

Exemples de toilettes publiques automatisées



Site et emplacement



ANNEXES 2 : Consignes pour les participants

CONSIGNES

VOTRE TÂCHE PRINCIPALE EST LA RÉALISATION DU PROJET EN RESPECTANT LES 6 CRITÈRES DE DESIGN QUI SONT ÉNÉMERÉS.

UNE FOIS QUE VOUS ÊTES PRÊT, AVISEZ L'EXPÉRIMENTATEUR.

VOUS AVEZ 22 MINUTES POUR RÉALISER VOTRE TÂCHE.

PENDANT LA RÉALISATION DU PROJET, VOUS POUVEZ RELIRE LE PROGRAMME AFFICHÉ SUR LE MUR.

SI VOUS ÊTES SATISFAIT DE VOTRE DESIGN ET SOUHAITEZ ARRÊTER L'EXPÉRIENCE AVANT LA FIN DES 22 MINUTES, AVISEZ L'EXPÉRIMENTATEUR.

REMETTRE À L'EXPÉRIMENTATEUR CE QUI VOUS A ÉTÉ DEMANDÉ.

VOTRE TRAVAIL SERA ÉVALUÉ PAR UN JURY EXPERT DE FAÇON ANONYME.

TRÈS IMPORTANT : LA TÂCHE D'ÉCOUTE EST SECONDAIRE. CONCENTREZ VOUS SUR VOTRE TÂCHE PRINCIPALE (LA CONCEPTION DU PROJET).

ANNEXES 3 : Consignes pour les évaluateurs

CONSIGNES POUR L'ÉVALUATION DES PROJETS

Dans le cadre d'un projet de recherche sur l'évaluation quantitative de la conception architecturale sous la supervision de Pierre Côté, professeur titulaire à l'école d'architecture de l'Université Laval, votre participation en tant qu'expert pour évaluer des projets architecturaux de 37 étudiants est requise.

Chaque sujet a réalisé trois projets (cf. annexe1) en utilisant aléatoirement un des 3 média de conception suivants: l'esquisse, la maquette ou le logiciel Sketch-Up.

Les participants avaient environ 22 minutes pour réaliser leur projet : Leur tâche était de concevoir une solution satisfaisante représentant leurs premières idées. Ainsi, la qualité des représentations ne constitue donc pas un critère d'évaluation.

Vous trouverez ci-dessous quelques consignes pour l'évaluation des projets.

1. Les évaluations sont anonymes et les projets vous seront présentés de manière aléatoire.
2. Avant de commencer le processus d'évaluation, relire la description des 3 projets et retenir les 6 critères de design pour chaque projet (cf. Annexe 1)
3. En utilisant les grilles d'évaluation fournies pour chaque projet, respecter les consignes suivantes:

- 3.1. Valider si les 6 critères de design ont été respectés en cochant dans la case appropriée dans la grille d'évaluation ;
- 3.2. Donner une note/évaluation globale du projet sur une échelle de 0 à 5 (0 étant la note la plus faible);
- 3.2. Donner une note/évaluation de chaque projet sur une échelle de 0 à 5 (0 étant la note la plus faible) pour les quatre paramètres suivants :

- I. **Évaluation globale du projet.**
- II. **Esthétique du projet :** harmonie des formes utilisées.
- III. **Originalité du projet:** présence d'idées neuves et originales, relations inhabituels et originaux.
- IV. **Fonctionnalité du projet:** respect des exigences et besoins fonctionnels du projet.

4. Lorsque vous avez terminé les évaluations, assurez-vous que toutes les informations demandées ont bien été complétées.

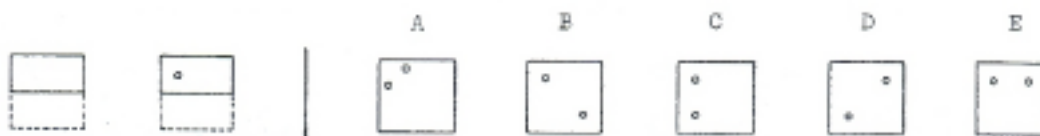
Merci pour votre participation !

ANNEXES 4 : Tests des capacités spatiales (Elkstrom et al., 1976)

TEST DE PLIAGE DE PAPIER — VZ-2

Dans ce test, vous allez imaginer le pliage et le dépliage de morceaux de papier. Dans chaque problème du test, il y a des figures dessinées à la gauche d'une ligne verticale et il y en a d'autres, dessinés à la droite de la ligne. Les figures à la gauche représentent un morceau de papier carré se faisant plier, et la dernière de ces figures a un ou deux petits cercles dessinés afin de montrer où le papier a été perforé. Chaque trou est apparent à travers toute l'épaisseur du papier à ce point dans le temps. Une des cinq figures à la droite de la ligne verticale démontre où les trous seront quand le papier sera complètement déplié. Vous devrez décider quelle figure parmi celles-ci est correcte et vous devrez dessiner un X au travers de cette figure.

Maintenant, essayez le problème ci-dessous. (Dans ce problème, un seul trou a été percé dans le papier plié.)



La bonne réponse de l'exemple ci-dessus est C, alors la figure devrait être marquée d'un X. Les figures ci-dessous montrent comment le papier a été plié et pourquoi la bonne réponse est C.



Dans ces problèmes, tous les plis qui ont été faits sont démontrés par les figures à la gauche de la ligne, et le papier n'est pas tourné ou déplacé d'une quelconque manière sauf pour faire le pliage qui est démontré dans les figures. N'oubliez pas, la réponse est la figure qui montre les positions des trous quand le papier a été complètement déplié.

Votre score à ce test sera le nombre de marquages corrects moins une fraction du nombre de marquages incorrects. Ainsi, il n'est pas à votre avantage de deviner, à moins que vous soyez capable d'éliminer un ou plusieurs des mauvais choix de réponse.

Vous aurez 3 minutes pour chacune des deux parties de ce test. Chaque partie comporte 1 page. Quand vous aurez fini la Partie 1, ARRÊTEZ. S'il vous plait, ne continuez pas à la Partie 2 avant qu'on vous le demande.

NE RETOURNEZ PAS CETTE PAGE AVANT QU'ON VOUS LE DEMANDE.

Page 2
Partie 1 (3 minutes)

					A	B	C	D	E	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

NE RETOURNEZ PAS CETTE PAGE AVANT QU'ON VOUS LE DEMANDE.

ARRÊTEZ.

Nom _____

Test de rotation des cartes -- S-1 (Rev.)

Ceci est un test vérifiant vos habilités à voir les différences entre certaines figures.
Regardez les 5 cartes à forme triangulaire ci-dessous :



Tous ces dessins représentent la même carte ayant été tournée à différentes positions.

Maintenant, regardez les 2 cartes suivantes :



Ces deux cartes ne sont pas identiques. La première ne peut pas être déplacée ou tournée afin de ressembler à la seconde. Pour y arriver elle aurait dû être retournée ou encore être faite différemment.

Chaque problème de ce test consiste en une carte à la gauche d'une ligne verticale et huit cartes à la droite. Vous avez à décider si chacune des cartes à la droite est identique ou différente de la carte à la gauche. Marquez d'un crochet le carré à côté du S s'il s'agit d'une forme identique. Marquez d'un crochet le carré à côté du D s'il s'agit d'une forme différente.

Pratiquez sur les lignes suivantes. La première ligne fut correctement marquée pour vous.



Votre résultat pour ce test sera le nombre d'items correctement identifiés moins le nombre d'erreurs. Donc, il ne serait pas à votre avantage de deviner sauf si vous avez une idée approximative de la réponse correcte. Travaillez le plus rapidement possible sans sacrifier votre précision.

Vous aurez 3 minutes pour chacune des deux parties de ce test. Chaque partie comporte 1 page. Lorsque vous aurez terminé la Partie 1, ARRÊTEZ. S'il vous plaît, ne poursuivez pas à la Partie 2 avant qu'on vous le demande.

NE RETOURNEZ PAS CETTE PAGE AVANT QU'ON VOUS LE DEMANDE.

Partie 1 (3 minutes)

1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									

NE RETOURNEZ PAS CETTE PAGE AVANT QU'ON VOUS LE DEMANDE.
ARRÊTEZ.

ANNEXES 5 : Questionnaire NASATLX

PARTICIPANT N° _____

Marquer d'un X les propositions suivantes

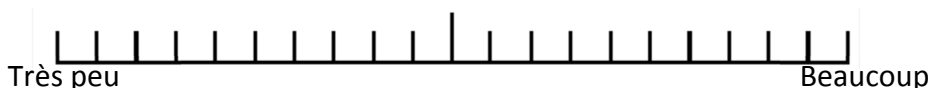
Exigence mentale

1. Dans quelle mesure avez-vous senti nécessaire de faire appel à vos ressources mentales et perceptives (par exemple : identifier, localiser, évaluer, différentier) ?



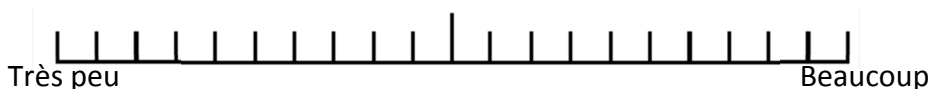
Exigence physique

2. Est-ce que cette activité a été physiquement éprouvante ?



Performance

3. Dans quelle mesure avez-vous atteint les objectifs que vous vous étiez fixés



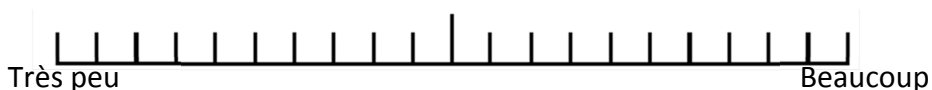
Effort

4. Avez-vous dû faire un effort (mental et/ou physique) pour produire votre design à travers l'outil utilisé ?



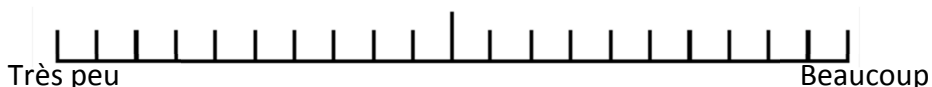
Frustration

5. Avez-vous ressenti du stress, ou avez-vous été découragé, irrité ou encore ennuyé ?



Exigence temporelle

6. Vous êtes-vous senti(e) pressé(e) par le temps ?



7. Lequel des 6 critères précédents (exigence mentale, physique, performance, effort, frustration, écoulement du temps), a été le plus influent sur votre activité d'idéation ?

ENCERCLEZ UN MOT PAR CADRE

EFFORT OU PERFORMANC E	EXIGENCE TEMPORELLE OU FRUSTRATION	EXIGENCE TEMPORELL E OU EFFORT	EXIGENCE PHYSIQUE OU FRUSTRATIO N	PERFORMANC E OU FRUSTRATION
EXIGENCE PHYSIQUE OU EXIGENCE TEMPORELLE	EXIGENCE PHYSIQUE OU PERFORMANC E	EXIGENCE TEMPORELL E OU EXIGENCE MENTALE	FRUSTRATIO N OU EFFORT	PERFORMANC E OU EXIGENCE MENTALE
PERFORMANC E OU EXIGENCE TEMPORELLE	EXIGENCE MENTALE OU EFFORT	EXIGENCE MENTALE OU EXIGENCE PHYSIQUE	EFFORT OU EXIGENCE PHYSIQUE	FRUSTRATION OU EXIGENCE MENTALE

ANNEXES 6 : Questionnaire profil du participant

PARTICIPANT N° :

Nom _____ Date _____

Sexe _____

Année de naissance _____

Etes-vous : Droitier Gaucher Ambidextre

Q1. étudiant au baccalauréat en quelle année _____

étudiant en maîtrise en quelle année _____

Q2. Langue maternelle: Anglais Français

Autre : _____

Q3. Formation de base en architecture faite au :

Québec\Canada

France

Autre : _____

Q4. Ordonnez de 1 à 5 les outils que vous utilisez lors de la phase conceptuelle²⁵ (#1 étant l'outil que vous utilisez le plus):

1. _____ Croquis / esquisses

2. _____ Maquette

3. _____ Précédents ou Sources d'inspiration (internet, livres, magazines)

4. _____ Logiciels de CAO (spécifier le logiciel)

5. Autres: _____

Q5. Quel est votre niveau d'habileté avec:

²⁵ La phase conceptuelle correspond à la première phase de conception; la phase où sont générées les idées et les concepts après la lecture du programme du projet. Il ne s'agit pas dans cette phase de raffiner les détails du projet (comme pour une critique finale).

- des logiciels de CAO:
 - SKECTHUP Aucun Débutant Passable Bon Excellent
 - AUTOCAD Aucun Débutant Passable Bon Excellent
 - FORMZ Aucun Débutant Passable Bon Excellent
 - 3D STUDIO Aucun Débutant Passable Bon Excellent
 - AUTRES (spécifiez-le) Débutant Passable Bon Excellent
- des esquisses Aucun Débutant Passable Bon Excellent
- des maquettes Aucun Débutant Passable Bon Excellent

Q6. Spécifiez plus précisément les outils que vous utilisez lors de la phase d'idéation :

Croquis / esquisses (calques, papier, papier millimétré, feutre, etc.) :

Maquette (pate à modeler, carton ondulé, foamboard, pistolet à colle, colle blanche, balsa, etc.)

Sources d'inspiration (internet, livres, magazines, etc.)

Logiciel de CAO (spécifier le logiciel)

Autres: _____

Q8. Énumérez les différentes étapes que vous faites habituellement pour réaliser un projet lors de la phase conceptuelle (de la lecture du programme à la réalisation des esquisses : compréhension du programme, émergence et représentation des idées, outil utilisé, etc.):

(ex : 1^{ère} étape : lecture du projet pour faire ressortir les contraintes du projet en encerclant les mots clés dans le texte OU 1^{ère} étape : lire le programme pour faire ressortir les premières idées sur papier ou calque OU 1^{ère} étape : lecture introspective (mentale du projet sans rien écrire ou encercler. Etc.

ANNEXES 7 : Questionnaire post-expérimental

N° Session : _____ N° projet _____ Outil _____

1. Comment évaluez-vous la difficulté de la tâche/projet (1 étant facile, 7 difficile)? :

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

2. Comment évaluez-vous votre performance lors de la réalisation de ce projet (1 étant très mauvaise, 7 très bonne)?

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

3. Comment évaluez-vous la créativité de vos idées, avant de les représenter et de les extérioriser (1 étant très mauvaise, 7 très bonne)

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

4.

5. Comment évaluez-vous la créativité de la solution finale que vous avez proposé (1 étant très mauvaise, 7 très bonne)?

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

6. Avez-vous eu de la difficulté à exprimer/représenter vos idées?

OUI	NON
-----	-----

7. Si oui, en quoi?

LES INSTRUMENTS DE MESURES :

8. Les lunettes vous ont-elles physiquement dérangées durant la réalisation de votre tâche?

 OUI NON

9. Si oui, en quoi?

10. Le port des écouteurs vous a-t-il physiquement dérangé durant la réalisation de votre tâche?

11. Si oui, en quoi?

 OUI NON

12. La tâche secondaire (énumération des chiffres) vous a-t-elle perturbé?

 OUI NON

13. Y a-t-il des moments précis durant la conception ou la tâche secondaire fut plus demandante en terme d'effort?

 OUI NON

14. Si oui, lesquels?

15. La complexité du projet a-t-elle amplifié cette demande d'effort?

 OUI NON

16. L'outil de conception utilisé a-t-il amplifié cette demande d'effort?

 OUI NON

LE PROCESSUS DE CONCEPTION

17. Décrivez, étape par étape, votre processus de conception durant cette session et avec cet outil?

18. Énumérez les 2 critères de design les plus difficiles à respecter?

1 _____

2 _____

19. Énumérez les 2 critères de design les plus faciles à respecter?

1 _____

2 _____

20. Quel autre outil de conception (logiciels, esquisse à main levée, etc.) auriez vous aimé utiliser à la place de celui-ci pour faciliter votre tâche de conception?

1 _____

21. Enumérer par ordre de préférence les 2 autres outils de conception que vous auriez aimé utiliser conjointement avec celui-ci pour faciliter votre tâche de conception?

1 _____

2 _____

22. Énumérer 2 éléments qui ont ralenti votre performance

1 _____

2 _____

23. Le temps imparti pour réaliser le projet était-il suffisant?

 OUI NON

24. Avez vous l'impression que vous étiez dans un contexte de création "normal", comme dans un atelier de design?

 OUI NON

25. Si non, pourquoi?

26. Arriviez vous à oublier tous les éléments perturbateurs (post-it, fond noir, projet affiché sur votre gauche, etc.)?

 OUI NON

27. Si non, au bout de combien de temps?

28. La posture « debout » vous a-t-elle dérangée?

 OUI NON

29. Si oui, en quoi?

30. La posture « debout » a-t-elle nuit à la réalisation de votre projet?

 OUI NON

31. Autres commentaires par rapport à l'expérience?

ANNEXE 8 : Corrélation entre la maîtrise des media et la charge cognitive

Corrélations

	QG Habiletés Esquisse	QG Habiletés Maquette	QG Habiletés Sketchup	Charge totale sk	Charge totale maquette	Charge totale esquisse	Sensibilité esquisse	Sensibilité maquette	Sensibilité sk	Temps de réaction esquisse	Temps de réaction maquette	Temps de réaction sk
QG Habiletés Esquisse	1											
Corrélation de Pearson		.425*	.034	-.078	.086	-.209	.002	-.062	-.127	-.217	-.040	.212
Sig. (bilatéral)		.012	.850	.662	.827	.236	.727	.726	.474	.218	.822	.228
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
QG Habiletés Maquette												
Corrélation de Pearson		.425*	.146	-.059	-.206	-.039	-.093	-.150	-.079	-.077	-.042	-.007
Sig. (bilatéral)		.012	.411	.738	.242	.826	.723	.397	.658	.664	.813	.968
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
QG Habiletés Sketchup												
Corrélation de Pearson		.146	1	-.173	-.355*	-.221	.236	.053	.113	-.195	-.060	.124
Sig. (bilatéral)		.411		.328	.039	.209	.179	.764	.524	.270	.736	.484
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Charge totale sk												
Corrélation de Pearson		-.059	-.173	1	.008	-.306	-.051	-.188	-.289	-.129	-.281	-.094
Sig. (bilatéral)		.662	.328		.966	.073	.773	.278	.092	.459	.102	.592
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Charge totale maquette												
Corrélation de Pearson		-.206	-.355*	.008	1	.034	.216	.299	.219	.131	.052	.030
Sig. (bilatéral)		.027	.039	.966		.844	.212	.081	.207	.452	.765	.866
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Charge totale esquisse												
Corrélation de Pearson		-.039	-.221	.306	.034	1	-.341*	-.069	-.168	-.102	-.140	-.211
Sig. (bilatéral)		.209	.073	.073	.844		.045	.095	.334	.561	.422	.224
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Sensibilité esquisse												
Corrélation de Pearson		-.063	.236	-.051	.216	-.341*	1	.636**	.565**	-.427*	-.279	-.109
Sig. (bilatéral)		.723	.179	.773	.212	.045		.000	.000	.011	.105	.535
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Sensibilité maquette												
Corrélation de Pearson		-.150	.053	-.188	.299	-.069	.636**	1	.709**	-.254	-.519**	-.417
Sig. (bilatéral)		.726	.764	.278	.081	.695	.000		.000	.141	.001	.013
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Sensibilité sk												
Corrélation de Pearson		-.127	.133	-.289	.219	-.168	.565**	.769**	1	-.400*	-.474*	-.515
Sig. (bilatéral)		.474	.524	.092	.207	.334	.000	.000		.017	.004	.002
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Temps de réaction esquisse												
Corrélation de Pearson		-.217	-.195	-.129	.131	-.102	-.427*	-.254	-.400*	1	.528**	.264
Sig. (bilatéral)		.218	.270	.459	.452	.561	.011	.141	.017		.001	.125
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Temps de réaction maquette												
Corrélation de Pearson		-.040	-.060	-.281	.052	-.140	-.279	-.519**	-.474*	.528**	1	.631
Sig. (bilatéral)		.822	.736	.102	.765	.422	.105	.001	.004	.001		.000
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Temps de réaction sk												
Corrélation de Pearson		.212	.124	-.094	.030	-.211	-.109	-.417*	-.515**	.264	.631*	1
Sig. (bilatéral)		.228	.484	.592	.866	.224	.033	.002	.125	.000		.35
N	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34

*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).
 **. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

ANNEXE 9 : Article publié à CAADFutures'11

A quantitative method to compare the impact of design media on the architectural ideation process

Pierre Côté, Ashraf Mohamed-Ahmed, Sébastien Tremblay

Université Laval, Canada

Abstract

Although we may know a lot about architectural design in terms of the inputs (e.g., early design decisions, programming, collaborative design) and outputs (e.g., project representations and building constructions), little is known about the actual design process itself. Currently, few studies have attempted to identify which cognitive functions are involved in the design process, how they operate, and to what extent they complement each other. From an extensive literature review, we have identified two cognitive functions, which are thought to underlie some of the complex activities involved in the design process, namely mental workload management and imagery. These two functions are quantitatively measured in the context of real design tasks using Bakan's task for workload management, and eye tracking for imagery.

To our knowledge, this paper presents the first attempt to address the complex design process in a quantitative and online manner. Preliminary results are reported testing the impact of three design media, namely: physical modeling, hand drawings, and CAD software. An interpretation of fractal structures is also given and proposed to account for the impact of different media on mental imagery.

Research Objectives

The research aims to propose, develop and validate a quantitative method for assessing the impact of medium – both analog and digital – on the design process, specifically during the phase of ideation, which we define as the internal and external representation, and back and forth formulation of the earliest design ideas. This assessment stems from the observation that whatever medium, system or technology is used to "assist" the design process, it comes with a cost in terms of a reduction in creative possibilities. Any medium limits the process of ideation in one way or another whether it is the learning curve required to master the technique or the interface (e.g., drawing, modeling software, etc.), the time necessary to obtain the result (the artifact), or the characteristics and properties that are required for the medium used (e.g., specific user skills). Thus, there is always a tradeoff for the designer in choosing a medium to reach a goal, from the idea to the artifact (or its representation), from the intangible to the tangible idea. The question then is which medium is the most effective for the process of ideation and which incurs the least cognitive cost? We propose a measure to evaluate this quantitatively.

The originality of the research stems from its proposed method. Previous comparisons of design media have essentially been qualitative in nature, often relying on subject verbalization for data acquisition, all depending at one point or the other upon the subjective interpretations of the experimenter, the participant, or both. However, verbal reports have been shown to be quite limitative in knowledge acquisition by many authors, namely Ericsson and Simon [1]. The proposed quantitative method eliminates this bias by

using an objective measure of the impact of each medium on the designer's cognitive processes [1].

Background

Currently, all assessment methods for design media and design process analysis are essentially qualitative and subjective, based upon participant answers or experimenter interpretation. In the current paper we evaluate and compare three different design media for three design situations. The first medium, the physical model, is analogue and is used as the control situation. It is currently taught extensively in our schools of architecture, and is one of the best-known and well-documented media [2]. Its 3D nature provides an unbiased point of view to compare with the second medium, which is 3D CAD software [3] (here SketchUp). Finally, the third medium, freehand drawings, is also studied widely and is very well documented [4].

For the development of spatial representations [5], mental imagery and cognitive control of resources and actions [6] are important factors in the design process. Thus, the incidence of the three media is evaluated and compared using two cognitive functions used in the process of ideation, namely mental workload management (measured by the Bakan task) and mental imagery (measured by the monitoring of eye movements). The Bakan vigilance task, performed concurrently with the main design task, requires the participant to detect a particular sequence of digits amongst random numbers presented in an auditory stream. The use of an auditory version of the Bakan task served to increase mental workload (the same higher-order cognitive management resources are used for both the primary and secondary tasks), whilst eliminating any more specific, direct competition with the design tasks in the visual modality.

Scale model

A physical model was used as an example of a 3D tool traditionally used in architecture teaching and practice, that could be compared to a 3D digital medium. Indeed, the scale model is a very effective tool for experimenting with potential structures, and means that decision-making and the validation of forms regarding details and textures are made directly with the design object. Moreover, it is a 3D shape that is manipulated and studied in the real world, thus controlling the formal research and proportions without intermediate images on the computer screen or drawn on paper. The model contains the thoughts and deliberations of a designer in the early stages of the process [7]. Also, the model, like the sketch, is a tool for visualization and simulation, which is quick, intuitive and widely used. In ideation, an imprecise and ambiguous model is sometimes more efficient for the designer than one with a more precise and finite form [4]. Changes are easily made and precision is not necessary for the expression of an idea [8]. Moreover, designing a model allows our brain to see the information, understand and respond to it. Like architects' sketches, Schön believes that models are a reflection of thoughts in action [9].

CAD software

Research on the study of external representations has mainly concentrated on "freehand" sketches in the conceptual phase. Some empirical research has investigated drawings or ideation through digital tools. Decortis et al. [10] pointed out that despite the abundance of architectural digital tools on the market, designs typically begin with a pencil and paper. Designers tend to transfer their designs to a computer at the end of their design process, by using it as a presentation tool. According to these

authors, digital tools require a high level of precision and no ambiguity while the factors of unconstraint and abstraction seem to be necessary in the first phases of design. However, other studies [11], [12] suggest that visual representations from digital tools provide a better understanding of forms and thus provide better support for visual thinking. Tang and Gero [13] argue that higher-level cognitive activities are not affected by the change of medium (traditional, vs. digital). To our knowledge, based on a protocol analysis [14], Bilda and Demirkan's research [11] is the first experimental study to explore cognitive activities during analog ideation (freehand sketches) versus digital ideation. The results showed that traditional media have advantages over digital media, in terms of perception of visual-spatial properties and production of alternatives. This conclusion is supported by the literature [4], [15] and the fact that designers are used to sketches as tools for representation throughout their education, which could limit their interaction with digital tools. In addition, the authors showed that the total number of cognitive actions was also higher with traditional media, which means that the designer's cognitive activity was more intense when they sketched. Moreover, the interest in 3D CAD in architectural design is fairly recent and studies about this medium are only qualitative, based on observations and protocol analysis [16], [17], [18].

Freehand drawings

Freehand sketches are often seen as abstract, ambiguous and imprecise [19]. The drawing is a graphical simulation system [16]. It allows for the representation of ideas with graphical objects through an interactive psychomotor process. The visual image becomes stronger when the results of this psychomotor activity are integrated with visual observations [20]. The connection of the mental image with psychomotor performance produces a physical image: a drawing. This is possible through a closed network consisting of graphical representations, vision, mental imagery and hand movement [21]. According to Furness, the creative process is enhanced when all three processes (visual, mental and psychomotor) are active. Furthermore, compared with detailed plans, sketching contains the thoughts and deliberations of the designer in the early stages of the process [7]. Lockard [22] argues that freehand drawing allows our cognitive system to see the information, understand and respond to it. By analyzing the drawings of architects, Schön [9] claims that they are thoughts in action.

In the 1990s, a great deal of research was concerned with the use of visual representations in the design process. These studies were mainly interested in sketches as tools for externalizing the mind of architects and the mental images that they held about a given problem. To Ullman and al. [23]: "[...] without the external media, there can be no resolution of problems." To summarize, studies of sketches argue that external representations are part of the design process [24]. They allow: (a) access to extended memory for mental images, (b) rapid manipulation of ideas because they can be rapidly produced, (c) a representation of information in various forms (different views and levels of abstraction), (d) store design solutions, (e) refine ideas, and (f) produce concepts and facilitate the resolution of problems.

Methodology

The proposed methodology provides a quantitative and objective measure of how cognitive functions might be supported by a design medium aide. Each cognitive function is associated with a quantitative measure. Before measuring any cognitive function, all participants had to attain a minimum level of competence across all three media.

The ecological validity of the experiment is an important issue. The experimental situation must be complex and dynamic, assessed at a global level without being segmented, and it cannot be intrusively managed. Therefore, a full design task is proposed (although limited in time), which captures the complexity of the design context. The design tasks are: a bus station, a recycling station, and a public restroom. Finally, only non-intrusive measures are applied during the experiments while intrusive ones were given only before or after the design task.

Mental imagery and workload management

Mental imagery and mental workload management are crucial cognitive functions with regard to the design process. From a cognitive standpoint, the design process (e.g., an architectural one) is defined as an unstructured, undefined, and open creative process (of problem solving, for some authors) where the need for internal representations (by cognitive functions) and external ones (by design media) is the same for all acts of design.

Research on the cognition of design is about the designer; trying to understand how he or she deals with their complex design task, and in particular with the medium they choose to perform the task of design. This design task is "composed of several problems, multifaceted and multi-domain rather than a single problem" [16]. In this iterative process of internal and external representations, the medium should be playing a central role. To understand the impact of a design tool on a designer's work, one must understand the relation between the designer and his/her medium, and thereafter the cognitive functions that are involved when using it.

However, the creative process of ideation includes several cognitive mechanisms that are either not formalized or difficult to identify [25]. Nevertheless, researchers have identified a cognitive function essential to the design process, namely mental imagery

Mental Imagery

This idea that architects use mental imagery in design is corroborated by independent observations [17], [19]. According to Kosslyn's theory [26], mental images are associated with working memory (WM) and are formed in the "visuospatial sketchpad", a part of Baddeley's WM model [27]. According to Baddeley's model, it is within the sketchpad that mental images are generated and that visual and spatial stimuli are processed.

Studying imagery could be quite difficult for obvious reasons, namely that it is difficult "to read or look at" contents of one's mind. Usually, researchers will rely on participants' verbalizations [4], [18]. In terms of quantitative methods, to our knowledge, no study in the field of architectural design has been conducted. However, studies of eye movements applied in the field of experimental psychology suggest that there is a link between eye movements and mental imagery [28], [29], [30]. Eye movements would act as a spatial index, which is stored and reused when forming a mental image, allowing for the proper arrangement of components [29].

Results from qualitative studies dealing with mental imagery in the field of design also highlight the role played by other cognitive functions, such as the management of cognitive workload. Studies on working memory show that cognitive workload capacity is limited if the tasks performed require the use of mental imagery. The externalization of ideas is therefore necessary to reduce the burden on cognitive workload management.

Management of Cognitive workload

According to Bonnardel [31], the complexity of the design task (e.g. ill-defined problems, imprecise and changing representations, and numerous constraints) implies that the designers' activity requires a considerable amount of cognitive resources. Several authors [16], [17], [31] argue that mental representations must be externalized in order to reduce the need for maintaining visual-spatial information in so-called Working memory. The concept of cognitive workload management has been widely used in psychology research over the past forty years [32]. It often refers to the amount of mental resources utilized by a participant to perform a task. There are several types of qualitative and quantitative measures that assess mental workload management (see [33]).

Our proposed theoretical model assumes an interrelation between mental imagery from which a decision emerges and the management of the cognitive workload. When designing, it is in working memory that the both cognitive functions interact from input media, and in the process, the knowledge and mental representations are stored in long-term memory (Figure 1).

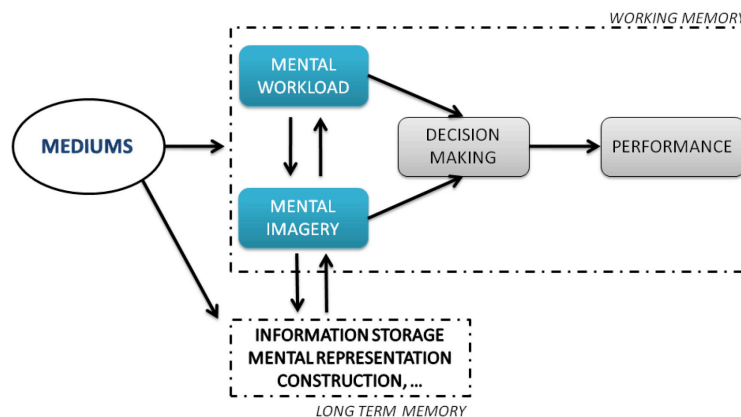


Fig. 1 Conceptual model linking cognitive functions and design media; inspired by Badeley's working memory model and Kosslyn's model of mental imagery.

Several researchers have highlighted the functional role of eye movement for mental imagery [28], [29]. Eye movements would act as spatial information store index that is reused when forming a mental image, thus allowing for the proper arrangement of components [30]. Mental imagery assessed by eye movement tracking, used a light handheld device (glasses) that is not detrimental to participant mobility and visual perception, and can be easily applied during the design exercise.

Participants

Participants were 19 students from one school of architecture who, to ensure their competence in design and media manipulation, were in the last three years of a five year course. Each participant completed three sessions using one of each of the three media: modeling (Mo), freehand drawing (Hd), and the CAD software (Cad). Participants were trained for a short period to become used to the experimental apparatus (namely glasses, headphones and a pedal). For each medium, they

performed a twenty-two minute task to design either a bus station (BUS), a recycling station (RS) or a public restroom (WC). Table 1 summarizes the sessions to which participants were randomly assigned.

Table 1 Session Management: Latin square design

	Session 1	Session 2	Session 3
Subject 1	BUS / Mo	WC / Cad	RS / Hd
Subject 2	RS / Mo	WC / Hd	BUS / Cad
Subject 3	BUS / Hd	RS / Cad	WC / Mo
Subject 4	RS / Cad	BUS / Mo	WC / Hd
Subject 5
⋮	⋮	⋮	⋮

Material

The eye tracker equipment used in the current protocol is an ASL Mobile Eye System. This head-mounted video-based eye tracker records pupil-corneal reflection and does not interfere with the mobility or the visual perception of the participant during the design task.

A Bakan's task that was adapted to the design tasks, measured the mental workload management. It is a dual task whereby the participant has to perform two tasks in parallel in order to increase the workload [34].

The Bakan's task was conducted as follows. Throughout the 22-minute design task, the numbers from one to five were played randomly over headphones at a rate of one every five seconds. The participant's task was to press on a foot pedal as quickly as possible whenever two ascending digits are repeated. The use of a foot pedal minimized interference with the main design task that required the use of hands. Before each experimental session, participants received a list of written instructions that clearly indicated that the design project was the main priority.

Procedures

The quantitative experimental session took about 30 minutes. After calibrating the glasses for eye movement, the participant had to practice freely for 3 minutes while wearing the glasses and headphones (necessary for Bakan's task) to become accustomed to wearing the hardware. Then, after reading the guidelines and criteria for the design project (± 5 minutes), participants had 22 minutes to execute the design task on a table allowing an upright posture.

The figure 2 below shows the results of these experimental design sessions.



Fig. 2: Samples of design session outcomes; column 1: bus station; column 2: recycling station; column 3: public restroom; row 1: physical models; row 2: cad models; and row 3: hand drawings.

Results and Analysis

Participant Profiles

The preliminary results are from a group of 19 students (12 male) who participated during the Fall Semester 2010 and Winter Semester 2011. Nine students were in the 3rd grade, four 4th grade, and six in 5th grade. Before starting the experiment, participants completed a questionnaire that evaluated their ability on a 5-point Likert scale (1 = no ability, and 5 = excellent ability) to use each of three design media. All participants considered themselves competent to use the media, with the highest score for the CAD medium (Responses Mean: Mo = 3,87; Hd = 3,39; and Cad = 4,17; N = 19).

Statistical Analysis

Bakan's task Analysis

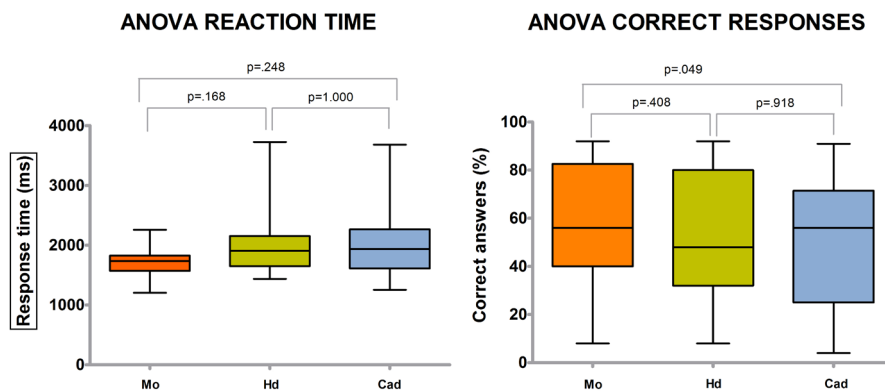
The capacity of working memory is limited but it is possible to perform competing tasks. Reaction time on the secondary task indicates the level of cognitive load induced by the main task [33], both of which involve similar cognitive management processes [32]. Table 2 shows the number of correct responses and reaction times.

Table 2 Reaction time (ms) and correct responses (%) of Bakan's task

	Mo Reaction Time (ms)	Hd Reaction Time (ms)	Cad Reaction Time (ms)
Mean	1734	1980	2051
Deviation	260,9	498,1	684,3
Median	1737	1910	1936
	Mo Correct Response (%)	Hd Correct Response (%)	Cad Correct Response (%)
Mean	60,03	53,45	47,65
Deviation	23,74	26,76	26,77
Median	56	48	56

Two metrics were used to analyze the Bakan's task results: The number of correct responses given by participants and reaction time. It should be noted that some subjects completed the design task in less than 22 minutes. In order to compare their results with the other participants (and given that a maximum of 25 correct responses were possible), the following ratio was computed (% of correct responses (for x minutes) = (# good responses / (25 - # of missing responses) x 100). Table 2 presents the results from which the box plots were generated (Figure 3). The box plots graphically depict data clustering based on five statistics: lowest observation, lower quartile, mean, upper quartile, and highest observation. These descriptive statistics show that subjects who used modeling (Mo) to conceptualize their project performed better on Bakan's task (greater number of correct responses and shorter reaction time).

One-way Anovas were computed for reaction time and correct responses. The results show that there is no significant difference between the three media for the two measured metrics ($p > .05$, $N = 19$). Only one significant difference was observed between Mo and Cad, for correct responses with $p = .049$, where modeling has a positive effect on correct responses over the CAD medium (Figure 3).

**Fig. 3** Bakan's secondary task; left: Box Plots of reaction time (ms); right: Box plots of correct responses (%)

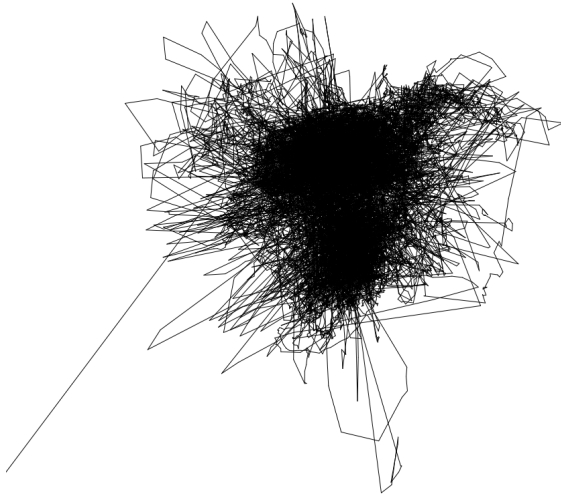
Given that this research is exploratory and descriptive, it is challenging to compare our quantitative results but we can build on the observations in the literature. The main issue about mental workload management is whether the externalization of cognitive activities is facilitated by one of the three design media. From the Bakan's task results we can see that there is no significant difference between the three media with regard to the required mental workload management. However, there seems to be a tendency for the CAD to be more demanding in terms of workload management for both reaction time ($Mo < Hd < Cad$) and correct responses ($Mo > Hd > Cad$).

One explanation could be that with modeling, unlike with the two other design media, the relatively slow pace of actions, which is intrinsic to the medium task (such as, taking a craft knife, cutting cardboard, using glue and waiting until it sets, etc...) could give more time to react properly to the secondary task. With sketches, subjects perform more actions (drawings) on the same laps of time. And for CAD, one must concentrate on multiple devices, such as the screen (and its multiples zones within), the keyboard, and the mouse, etc..

Regarding reaction time (i.e., $Mo < Hd < Cad$), the results are consistent with the correct response data ($Mo > Hd > Cad$). One explanation (hypothesis) could be that the actions pace proper to each medium affects inversely the reaction time.

Scanpaths Analysis

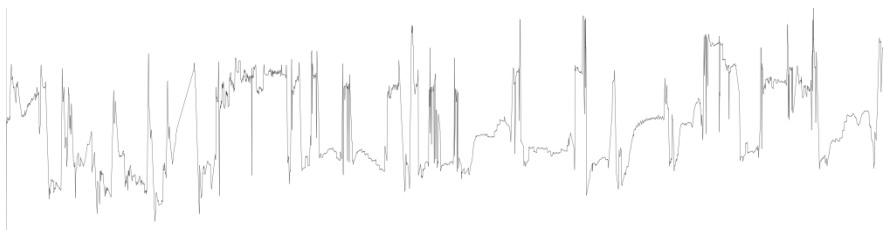
Scanpath analysis was performed looking at participants' scanpath fractal structure. Fractal use is not new to characterize eye movements [35], [36]. Here, the fractal dimension is the metric used. The interest in fractals and fractal dimension is twofold: practicality, since it allows one to look at a large amount of data at once in order to characterize and then compare sets (the average scanpath results in more than 30,000 points). The other is more fundamental. Fractals account for spatial structure and thereby could help understand how the scanpath pattern is geometrically built, structured, and generated [37]. To our knowledge, this report is the first account of the fractal dimension interpretation of scanpath patterns. Figure 4 illustrates an example eye movement scanpath in the XY plan.



f.d. = 1,619

Fig. 4 XY scanpath plan, subject 13, recycling station, with Cad.

The XYT space in which fractals are projected should be interpreted as follows. The XY plan coincides with the scene image, which is orthogonal to the vector view towards which the subject looks, and the YT (or XT) plan is in the "Z direction", with T as the time axe. For illustration purposes, Figures 4 and 6 are reported in the XY plan, while Figure 5 is in the YT plan. Each pattern is reported with its estimated fractal dimension (f.d.), which was computed using the "box-counting" algorithm [38]. Figure 4, in the XY plan, accounts for all the points of subject 13's session using CAD to design a recycling station (40 326 points used, 1 901 rejected for 4,50%), while Figure 5 presents the first of ten segments (3 885 out of 38 853 points) of subject 1's session, this time using hand drawing to design a recycling station, but in the YT plan.



f.d. = 1,276

Fig. 5 TY scanpath plan, subject 1, green station, hand drawing, first segment of ten (3 989 points).

Ten segments of a scanpath are fully illustrated in Figure 6 for the XY plan of subject 7's session with CAD (3 801 points / segment).

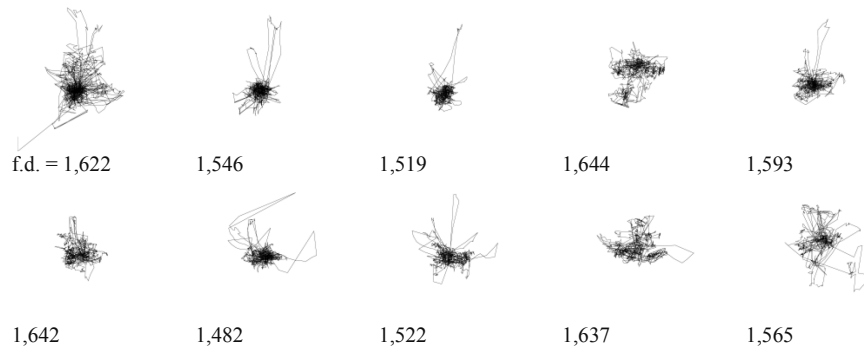


Fig. 6 Fractal dimensions and XY plan of scanpath segments (10), subject 7, bus station, Cad.

For each medium, results obtained from the nineteen subjects are reported in Figure 7. The specific design task was randomly assigned as described in the previous section. Few observations can be made about this graphic. The modeling medium (Mo) tends to have higher fractal dimension values, followed by the hand drawing (Hd), and the CAD medium the lowest. Moreover, we can observe that CAD and hand drawing (Hd) media values are more alike. As for the Bakan's task, there is no significant difference between the three media ($p > .05$, $N = 19$). The observed trend in the data ($Mo > Hd > Cad$), is reinforced for all subjects. Based on the definition of fractals [37] and our current results, one interpretation of a higher fractal dimension value is a greater and more thorough (denser) scanning of one's visual field.

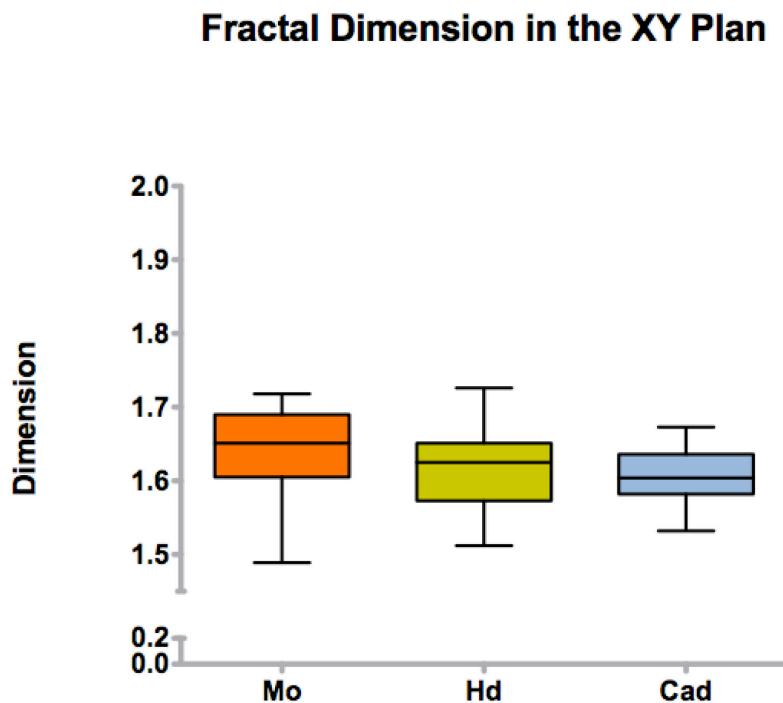


Fig. 7 Fractal dimension in the XY plan for each medium, Mo: Modeling, Hd: Hand drawing and Cad: CAD, ($N = 19$); Repeated measures anova not significant ($p > 0.5$, $N = 19$).

Conclusion

This paper is concerned with quantitatively measuring the impact of design media on designers' cognitive processes. Two cognitive functions are investigated, namely, the management of mental workload and mental imagery measured, respectively, with Bakan's task and eye tracking in the context of real architectural design tasks.

The 22-minute design session generated a large amount of data that are only partially reported and analyzed in this paper. However, preliminary results on workload management show that there is no significant difference between the three media, with a tendency for CAD to be the more demanding medium. A closer look at workload management would be interesting, for example, during the design process a particular tool could require fewer cognitive resources at one stage or another.

Scanpath analyses reported are preliminary results. In particular, scanpath segmentation (Figure 6) should be performed for both plans XY and YT, in order to better compare the design media and to identify potential sequences in the process of design. However, fractal dimension measures do not show any significant difference between the media. Moreover, based on the fractal definition, results show that modeling – followed by hand drawing and CAD – tends to induce a denser field of view.

References

- Ericsson KA, Simon HA (1984) Protocol analysis: Verbal reports as data, Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
1. Côté P, Mohamed-Ahmed A, Tremblay S, Dorta T (2008) Towards a quantitative method for evaluating architectural media impact on ideation, Poster, Third international conference on design computing and cognition (DCC'08), Bringing artificial intelligence, cognitive science and computational theories to design research, 23–25 June 2008, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
 2. De Paoli G (2005) Observatoire des techniques numériques, un espace interdisciplinaire, Colloque Art, Architecture et Ingénierie, Mars 2005, Tunis, Tunisie.
 3. Coyne R (2001) Developments in the use of CAD in Architecture, <http://ace.caad.ed.ac.uk/richard/web/DevCAD/>, [viewed, December 14, 2010].
 4. Goel V (1995) Sketches of Thought, Cambridge: The MIT Press.
 5. Tremblay S, Saint-Aubin, J, et Jalbert, A (2006) Rehearsal in serial memory for visuo-spatial information: Evidence from eye movements, *Psychonomic Review & Bulletin*.
 6. Jobidon M-È, Breton R, Rousseau R, et Tremblay S (2006) Le rôle de la coopération et de la communication sur l'efficacité du travail d'équipe en situation complexe et dynamique, 28e congrès annuel de la Société québécoise pour la recherche en psychologie (SQRP), Montréal, 17-19 mars, 2006, résumé p. 144.
 7. Donath D et Holger R (1995) VRAD (Virtual Reality Aided Design) in the early phases of the architectural design process, in Proceedings of the CAAD Futures Conference, Singapore: Computer Aided Architectural Design Futures, pp.313-322.
 8. Zeleznik R, Hemdon K, et Hugues J (1996) SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes, Proceedings of the Association for Computing Machinery (ACM) Computer Graphics Conference.
 9. Schön D (1985) The Design Studio, RIBA Publications, Londres.
 10. Decortis, F., Safin, S. & Leclercq, P. (2005). A Role for External Representations in Architectural Design? The Influence of a Virtual Desk and an Early 3D View on the Design Activity. Paper presented at the International Workshop on Understanding designers'05, Aix en Provence.
 11. Bilda Z, and Demirkan H (2003) An insight on designer's sketching activities in traditional versus digital media. *Design Studies*. v24, no 1, pp. 27-50.

- 12 Madrazo, L. (1999). Types and Instances: a paradigm for teaching design with computers. *Design studies*, 20(2), 177- 193.
- 13 Tang, H-H and Gero, JS (2010) Comparing collaborative co-located and distributed design processes in digital and traditional environments: A protocol study using the Function-Behavior-Structure coding scheme, *Design Studies* (to appear).
- 14 Suwa, M., Purcell, T. & Gero, J.S. (1998). Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions, *Design Studies* 19(4): 455–483.
- 15 Akin, O: 1986, *Psychology of Architectural Design*, Pion, London
- 16 Lebahar, J.-C. (2007). *La conception en design industriel et en architecture : désir, pertinence, coopération et cognition*. Paris: Lavoisier.
- 17 Bilda, Z and Gero, JS (2008), Idea development can occur using imagery only during early conceptual designing, in JS Gero and AK Goel (eds), *Design Computing and Cognition'08*, Springer: 303-320.
- 18 Kan, JWT and Gero, JS (2009) A generic tool to study human design activity, in R Noell Bergendahl, M, Grimheden, M, Leifer, L, Skogstad, P and Badke-Schaub, P (eds), *Human Behavior in Design*, Design Society, pp. 9:123-134.
19. Tversky, B. (2002). What do sketches say about thinking? In T. Stahovic, J. Landay, and R. Davis (Editors), *Proceedings of AAAI spring symposium on sketch understanding*. Pp. Menlo Park, CA: AAAI Press.
20. Furness, T.: 1987, *Designing in Virtual Space*, in W. Rouse, and K. Boff (eds), *System Design: Behavioral Perspectives on Designers, Tools and Organization*, North-Holland, New York, pp. 127–143.
21. Laseau, P. (2000). *Graphic Thinking for Architects & Designers*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
22. Lockard, W.: 1973, *Design Drawing Experience*, Pepper Publishing, Tucson.
23. Ullman, DG, Wood, S & Craig, D: 1990, The importance of drawing in the mechanical design process, *Computers and Graphics* 14(2): 263–274
24. Do E Yi-L Gross, MD, Neiman, B and Zimring, C: 2000, Intentions in and relations among design drawings, *Design Studies* 21(5): 483-503.
25. Huot, S. (2005). *Une nouvelle approche pour la conception créative: De l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions non-standard*. Thèse de doctorat. Université de Nantes
26. Kosslyn, S.M. (1994) *Image and brain - the resolution of the imagery debate* . Cambridge, MA, MIT Press. 528 p.
27. Baddeley, A. D., & Baddeley, A. D. (2007). *Working memory, thought, and action*. Oxford ; New York: Oxford University Press.
28. Laeng, B., and Teodorescu, D.-S. (2002). Eye scanpaths during visual imagery reenact those of perception of the same visual scene. *Cognitive Science*, 26, 207-231.
29. Mast, F.W., and Kosslyn, S.M. (2002). Eye movements during visual mental imagery. *Research Update. TRENDS in Cognitive Sciences*, Vol.6, No.7, July, pp. 271-272
30. Johansson R, Holsanova J, Holmqvist K (2005) What do Eye Movements Reveal about mental imagery? Evidence from visual and verbal elicitation, In *Proceedings of the 27th Cognitive Science Conference*, 1054-1059.
31. Bonnardel N (2006) *Créativité et conception : approches cognitives et ergonomiques*, Marseille, Solal.
32. Chanquoy L, Tricot A, Sweller J (2007) *La charge cognitive*. Paris: A. Colin.
33. Gawron, V (2008) *Human performance, workload, and situational awareness measures handbook*, 2d ed, CRC / Taylor & Francis.
34. Wickens CD, Hollands JG (2000) *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
35. Masayushi N, Mayumi O-H, Teijun M (2007) Relationship between Image Gaze Location and Fractal Dimension, *IEEE*, 4014-4018.
36. Renaud P, Chartier S, Albert G, Décarie J, Cournoyer LG, Bouchard S (2007) Presence as Determined by Fractal Perceptual-Motor Dynamics, *Cyberpsychology & Behavior*, Volume 10, Number 1, 122-130.
37. Mandelbrot B (1973) *Les objets fractals : Forme, hasard et dimension*, Flammarion.
38. Bourke P (2003) FDC: Fractal Dimension Calculator, <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/fractals/fracdim/>, [viewed, January 17 2011].

