Articulation Ergonomie-Design-Conception Mécanique : approche méthodologique de la convergence multidisciplinaire

Gaël Guerlesquin

▶ **To cite this version:**

Gaël Guerlesquin. Articulation Ergonomie-Design-Conception Mécanique : approche méthodologique de la convergence multidisciplinaire. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2012. Français. NNT : 2012BELF0181 . tel-00719618v3

HAL Id: tel-00719618

https://theses.hal.science/tel-00719618v3

Submitted on 28 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (S.P.I.M.)

Année 2012

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur (Génie mécanique)

Présentée et soutenue publiquement par :

GAËL GUERLESQUIN

Le 29 06 2012

A l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

ARTICULATION ERGONOMIE – DESIGN – CONCEPTION MECANIQUE : APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE

JURY

Patrick TRUCHOT,	Professeur des Universités, INPL, Nancy	Rapporteur
Hamadi BOUABID,	Professeur des Universités, Université de La Manouba, (Tunisie)	Rapporteur
Simon RICHIR,	Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
Pascal BERNARD,	Directeur Général et Technique, Fam Automobiles	Invité
Jean-Claude SAGOT,	Professeur des Universités, UTBM	Directeur de thèse
Morad MAHDJOUB,	Maître de Conférences, UTBM	Co-directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord à remercier les professeurs Patrick Truchot, de l'INPL (Nancy) et Hamadi Bouabid, de l'Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de Design, Université de La Manouba (Tunisie) qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de mes travaux de thèse.

Je remercie aussi le professeur Simon Richir, des Arts et Métiers ParisTech (Paris) et Monsieur Pascal Bernard, Directeur Général et Technique de l'entreprise Fam Automobiles, pour leur implication en tant que membres du jury.

J'adresse mes plus sincères remerciements au professeur Jean-Claude Sagot, responsable du département Ergonomie, Design et Ingénierie Mécanique de l'UTBM (Montbéliard), de m'avoir accueilli au sein de son équipe et d'avoir encadré les travaux qui ont fait l'objet de cette thèse. Merci pour les conseils avisés que vous avez su me donner, et pour les nombreuses discussions dont ont fait l'objet nos travaux de recherche. Je tiens à remercier vivement Morad Mahdjoub, Maitre de Conférence à l'UTBM et co-encadrant, pour son investissement dans cette thèse. Merci pour ton soutien moral et ta disponibilité, en particulier lors de la dernière ligne droite.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à Pays de Montbéliard Agglomération (PMA) pour le soutien financier de cette thèse et pour s'être investi dans la mise en lumière de nos résultats.

Je remercie l'ensemble des membres de l'équipe ERCOS du laboratoire SET pour leur accueil et leur disponibilité. Merci à Florence et à Jean-Bernard pour la relecture du mémoire et les conseils qu'ils ont pu m'apporter ces derniers mois. J'ai une pensée particulière pour tous les doctorants de l'équipe, qui ont encore devant eux de longues et belles journées ! (Thierry, courage, on arrive au bout !). Je remercie l'ensemble des Enseignants-Chercheurs, ingénieurs et techniciens de recherche de l'équipe pour leur sympathie, leur aide sur les différents projets que nous avons menés ensembles et les nombreuses discussions passionnées que nous avons pu avoir. Je pense en particulier à Lucien, Sébastien (Che), Sébastien (Cha), Hugues, Marjorie, Céline, Thierry, Jérôme, Maxime. Je remercie aussi Sylvie et Valérie pour leur disponibilité et la qualité de leurs conseils.

D'autre part, je tiens à remercier tous les élèves-ingénieurs de l'UTBM qui ont participé de près ou de loin à nos recherches. Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont partagé mes journées lors de ces dernières années, je pense en particulier à tous les musiciens du Bigband de l'UTBM, mais aussi à tous les étudiants et enseignants investis dans la vie de notre établissement. Merci à celles et ceux qui partagent ma vie et qui la partageront dans les années à venir.

à ma coach de thèse, qui m’a guidé depuis le début,

merci pour tout…

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 3

SOMMAIRE 5

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION 10

1. ENJEUX INDUSTRIELS : L'INNOVATION PAR L'INTEGRATION DE L'ERGONOMIE ET DU DESIGN INDUSTRIEL DANS LA CONCEPTION DE PRODUITS MECANIQUES 11
2. CONTEXTE SCIENTIFIQUE : AU CROISEMENT DES SCIENCES DE L'INGENIEUR ET DES SCIENCES DE L'HOMME 13
3. POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE 14
4. PLAN DE THESE 15

CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE 19

1. INTRODUCTION 20
2. LE PROCESSUS DE CONCEPTION DE PRODUITS MECANIQUES 20

2.1. CONCEPTION ET RESOLUTION DE PROBLEME 20

2.1.1. Généralités et définitions 20

2.1.2. Notion de degré de liberté 21

2.1.3. Notion de divergences et de convergences 22

2.2. LES METHODOLOGIES ET PROCESSUS DE CONCEPTION 23

2.2.1. Méthodologies prescriptives et descriptives 23

2.2.2. Processus retenu et détail des phases 25

3. LA NECESSITE D'UNE APPROCHE PLURIELLE 27

3.1. DES BESOINS MULTIPLES 27

3.1.1. Les besoins d'usage 28

3.1.2. Les besoins d'estime 29

3.1.3. Les nécessités techniques 29

3.2. LA CONCEPTION : UN CARREFOUR DE DISCIPLINES 30

3.2.1. L'ergonomie 31

3.2.2. Le design industriel 32

3.2.3. La conception mécanique 33

3.3. ORGANISATION D'UNE EQUIPE PROJET MULTIDISCIPLINAIRE 34
3.3.1. Vers une conception simultanée et concourante 34
3.3.2. Différentes organisations de projet 35
3.3.3. Pilotage projet et leadership 36
4. INTEGRATION DE L'EXPERTISE METIER 38
4.1. NOTION DE DESIGN FOR X 39
4.1.1. Définition du DFX 39
4.1.2. Design for Ergonomics 39
4.1.3. Design for Aesthetics / Design for Emotion 40
4.2. L'INTEGRATION DE L'EXPERTISE METIER DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION 40
4.2.1. L'intégration de l'ergonomie 40
4.2.2. L'intégration du design industriel 42
4.3. SYNTHESE ET CONSTATS 45
5. PROBLEMATIQUE ET PREMIERE HYPOTHESE DE RECHERCHE 46

CHAPITRE 3 : APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'INTEGRATION DE L'ERGONOMIE ET DU DESIGN INDUSTRIEL DANS LA CONCEPTION 48

1. INTRODUCTION 49
2. PROPOSITION D'UN NOUVEAU MODELE DE CONCEPTION 50
2.1. COORDINATION DE DIFFERENTES APPROCHES DE LA CONCEPTION 50
2.2. METHODOLOGIE GLOBALE DE CONCEPTION PLURIDISCIPLINAIRE 52
2.2.1. Le rôle de l'ergonome dans le nouveau modèle (cf. figure 13, p. 55) 52
2.2.2. Le rôle du designer industriel dans le nouveau modèle (cf. figure 13, p. 55) 53
2.2.3. Le rôle du concepteur mécanicien dans le nouveau modèle (cf. figure 13, p. 55) 53
2.2.4. Synthèse 54
3. EXPERIENCE 1A : MISE A L'EPREUVE DU MODELE PROPOSE – PROJET INTERREG 55
3.1. INTRODUCTION 55
3.2. PROTOCOLE 56
3.3. REALISATION : MISE A L'EPREUVE DU MODELE PROPOSE 57
3.3.1. Phase 1 : Etude et analyse des besoins 57
3.3.2. Phase 2 : Recherche de solutions 59
3.3.3. Phase 3 : Développement de la solution 60
3.3.4. Phase 4 : Validations 62
3.4. RESULTATS ET CONCLUSIONS 63

3.4.1. Accompagnement des acteurs dans le processus de conception : vers une méthodologie prescriptive multidisciplinaire 63
3.4.2. Phases de convergence et formalisations intermédiaires 65
4. EXPERIENCE 1B : IDENTIFICATION DES INTERACTIONS MULTIDISCIPLINAIRES LORS DES PHASES DE CONVERGENCE 66
4.1. INTRODUCTION 66
4.2. PROTOCOLE 67
4.3. REALISATION : ETUDE DES INTERACTIONS MULTIDISCIPLINAIRES 67
4.3.1. Phase 1 : Etude et analyse des besoins 67
4.3.2. Phase 2 : Recherche de solutions 69
4.3.3. Phase 3 : Développement de la solution 71
4.3.4. Phase 4 : Validations 72
4.4. RESULTATS ET CONCLUSIONS 73
4.4.1. Caractérisation des interactions entre métiers 73
4.4.2. Interactions, métiers et outils 74
4.4.3. Des formalisations complexes 75
5. CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET DEUXIEME HYPOTHESE DE RECHERCHE 76
5.1. CONCLUSION DE L'APPROCHE METHODOLOGIQUE 76
5.1.1. Compromis entre des valeurs d'usage et d'estime et des valeurs techniques 77
5.1.2. Les formalisations d'aide à la convergence 79
5.1.3. Modèle final 80
5.2. DIFFICULTES D'ECHANGES ET D'INTERACTIONS : VERS PLUS DE FORMALISATIONS INTERMEDIAIRES MIXTES 82
5.2.1. Améliorer les interactions multidisciplinaires de type Conception Mécanique – Design Industriel ou Conception Mécanique – Ergonomie 82
5.2.2. Les Formalisations Intermédiaires : moyen d'intégration du design industriel et de l'ergonomie 84
5.2.3. Deuxième hypothèse de recherche : La réalité virtuelle comme support de Formalisation Intermédiaire 85

CHAPITRE 4 : LA REALITE VIRTUELLE COMME OUTIL D'AIDE A LA CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE 87

1. INTRODUCTION 88
2. EXPERIENCE 2A : POSITIONNEMENT DE LA RV DANS UN PROJET DE CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE – PROJET FCITY 89

2.1. OBJECTIFS ET CONTEXTE 89
2.2. MOYENS ET RESSOURCES 90
2.3. REALISATIONS : ETUDE DE LA RV COMME OUTIL D'AIDE A LA CONVERGENCE 91
2.3.1. Articulation Ergonomie – Conception mécanique 91
2.3.2. Articulation Design Industriel – Conception mécanique 95
2.4. CONCLUSIONS 98
3. EXPERIENCE 2B : ETUDE DES CONVERGENCES DESIGN INDUSTRIEL – CONCEPTION MECANIQUE EN REALITE VIRTUELLE 99
3.1. OBJECTIFS ET CONTEXTE 99
3.2. MOYENS, RESSOURCES ET PROTOCOLE 100
3.3. REALISATION : ETUDE DES CONVERGENCES DESIGN INDUSTRIEL – CONCEPTION MECANIQUE ASSISTEES PAR LA RV 101
3.3.1. Phase 1 : Etude et analyse des besoins 101
3.3.2. Phase 2 : Recherche de solutions 102
3.3.3. Phase 3 : Développement de la solution 104
3.3.4. Phase 4 : Validation 106
3.4. CONCLUSIONS 106
3.4.1. Validations successives des aspects du produit 106
3.4.2. Choix de la technologie adaptée à l'application à développer 107
4. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 109
4.1. LA RV COMME SUPPORT DES FORMALISATIONS INTERMEDIAIRES EN PHASE DE CONVERGENCE 109
4.2. VERS UNE METHODOLOGIE DE CONVERGENCE 109

CHAPITRE 5 : CONTRIBUTIONS DES TRAVAUX DE THESE: APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE 111

1. INTRODUCTION 112
2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS 112
3. METHODOLOGIE DE CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE 113
3.1. PROPOSITION DU CADRE METHODOLOGIQUE PROPOSE 113
3.1.1. La convergence dans le processus de conception 113
3.1.2. Modèle générique du processus de convergence multidisciplinaire 114
3.1.3. Détail du processus de convergence proposé 115
3.2. MODELE DE CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE 116
3.2.1. Caractérisation des confrontations en convergence 117

3.2.2. Caractérisation des itérations en convergence 118
3.3. PROPOSITION DE METHODOLOGIE DE CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE 119
3.3.1. Phase 1 : Préparation de la convergence 120
3.3.2. Phase 2 : Réalisation de la convergence 128
3.3.3. Phase 3 : validation de la convergence 131
4. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 134
4.1. PREMIERE FORMALISATION DU PROCESSUS DE CONVERGENCE 134
4.2. VERS UNE CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE ADAPTEE A CHACUN DES CONCEPTEURS 135
4.3. VERS UNE CONVERGENCE INTEGREE 135

CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 137

1. CONTRIBUTIONS METHODOLOGIQUES ET RESULTATS 138
1.1. METHODOLOGIE GLOBALE DE CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE ET PREMIERES EXPERIMENTATIONS 138
1.2. LA REALITE VIRTUELLE COMME SUPPORT DE LA CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE 140
1.3. METHODOLOGIE DE CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE ASSISTEE PAR LA RV 141
2. PERSPECTIVES ET DISCUSSIONS 142
2.1. APPROFONDISSEMENT ET GENERALISATION DES TRAVAUX 142
2.2. VERS UN CONCEPTEUR-COORDINATEUR MULTI-METIER 143
2.3. EXTENSION DU CADRE D'ETUDE, CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE ELARGIE 144

BIBLIOGRAPHIE 146

1. NORMES 146
2. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 146

TABLE DES FIGURES 161

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Ce chapitre se propose d'introduire nos travaux de thèse menés au sein du laboratoire Systèmes et Transports (SeT E.A.3317), de l'Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société (IRTES), de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Les études présentées dans ce manuscrit portent sur les méthodologies de conception de produits mécaniques et en particulier sur l'intégration de l'ergonomie et du design industriel.

Dans ce chapitre, nous définirons dans un premier temps les enjeux industriels de nos travaux. Nous montrerons en particulier que les entreprises ont besoin d'une démarche innovante de conception de produits afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Dans ce contexte, l'intégration des métiers de l'ergonomie et du design industriel dans le processus de conception de produits mécaniques devient une priorité. En effet, le triptyque qualité-coût-délai n'est plus le seul facteur à considérer. Les notions d'usage et d'estime font leur apparition et nécessitent des approches spécifiques.

Ce contexte nous amènera ensuite à poser un cadre scientifique, au croisement des sciences de l'ingénieur et des sciences de l'Homme. Nous mettrons ainsi en évidence que notre thématique de recherche s'inscrit dans une démarche plus globale de repositionnement du processus de conception de produits mécaniques autour de l'utilisateur final (conception centrée sur l'utilisateur).

Sur la base de ces contextes, nous définirons notre positionnement scientifique et sémantique avant de présenter dans une dernière partie, le plan du mémoire.

1. Enjeux industriels : l'innovation par l'intégration de l'ergonomie et du design industriel dans la conception de produits mécaniques

Avec l'évolution des techniques et des technologies de ces dernières décennies, les processus de conception de produits mécaniques ont été confrontés à de grandes modifications. Lors de la révolution industrielle, l'acier a pris une place extrêmement importante dans la construction, donnant lieu à la création de nouveaux savoir-faire et de nouvelles disciplines. L'arrivée de la plasturgie a ouvert la porte à de nouvelles formes et structures donnant davantage de liberté aux créateurs. Les nouvelles technologies ont, elles aussi, joué un rôle important dans l'intégration de systèmes complexes. L'électronique, la mécanique, l'informatique, se sont retrouvées confrontées à des problématiques communes de création de produits : satisfaire le client tout en permettant à l'entreprise de faire des bénéfices.

Pendant ce temps, l'industrie s'est organisée. Les entreprises sont passées de structures locales à des multinationales et la production de masse a fortement augmenté. Le secteur industriel devenu hautement concurrentiel et hyper segmenté a poussé les équipes de conception à réduire les coûts de production, en respectant le triptyque qualité-coûts-délais [JENK 2010].

Néanmoins, aujourd'hui, ce trio seul ne permet plus au final à un utilisateur d'être totalement satisfait. On se rend compte que les aspects techniques ne sont plus les seuls critères de sélection des acheteurs. De multiples entreprises ont mis en avant d'autres caractéristiques du produit. Alors qu'auparavant, on pouvait vendre une voiture ou une cocote minute en garantissant solidité et fiabilité, ce sont maintenant des notions d'esthétique, ou d'usage qui permettrons de vendre des produits. Ce souci de recentrer les produits sur les utilisateurs a été mis en évidence par de nombreux auteurs parmi lesquels Norman [NORM 1989] et Brangier [BRAN 2003]. Si bien qu'aujourd'hui, un produit adapté culturellement, physiologiquement à l'utilisateur, un produit qui a tendance à plaire ou ne serait-ce qu'attirer l'œil du consommateur par une esthétique particulière, dispose d'un atout commercial important sur un marché toujours plus concurrentiel. Cela se vérifie sur de nombreux secteurs industriels : l'automobile, les équipements sportifs et de loisir, le mobilier, le matériel de cuisine, etc. [JORD 2000] [MIDL 2004].

La multinationale IKEA, parmi d'autres, l'a compris très tôt et a placé cette notion d'affectivité au centre de sa philosophie de conception. Ainsi, le marketing et le design industriel ont une place extrêmement forte dans leurs processus de conception et de développement de produits. Dans un rapport rédigé pour le ministère de l'éducation nationale, en partenariat avec le Centre d'Etudes et de Ressources pour les Professeurs de l'Enseignement Technique (CERPET), IKEA présente son processus de conception et met en évidence une notion que nous détaillerons dans la suite de nos travaux : la valeur d'estime [IKEA 2006]. Cette valeur d'estime est définie comme *la considération affective que l'utilisateur attache au produit lors de son achat ou de son utilisation*. Pour la multinationale, l'acteur métier garant de cette valeur d'estime est le designer industriel, qui, tout en étant intégré à l'équipe de conception, doit permettre une liaison harmonieuse des éléments d'usage et des éléments d'image. Cette notion renvoie donc aux sens de l'utilisateur, et en particulier à la vue et au toucher toujours selon le même rapport.

De son côté, Mahdjoub [MAHD 2007b] rappelle qu'un produit qui fonctionne ne suffit plus pour mieux être vendu, et en accord avec de nombreux auteurs [GUID 1997] [MALL 1996] [SAGO 1999] [NORM 2004] [BRAN 2003], il ajoute que des travaux sur la personnalisation du produit, mais aussi sur la qualité et la valeur d'usage, ainsi que sur le confort d'usage et la simplicité d'emploi, permettent de faire la différence entre deux produits à performances techniques égales.

Dans ce contexte, l'enjeu est de permettre une meilleure intégration de la valeur d'usage d'une part, à travers la discipline d'ergonomie, et de la valeur d'estime d'autre part, à travers le design industriel, afin de permettre aux entreprises de mettre sur le marché des produits toujours plus attractifs et adaptés à l'Homme. Au travers de cette nouvelle approche pluridisciplinaire de la conception, une innovation devient possible dans les processus de conception [TRUC 1997].

2. Contexte scientifique : Au croisement des Sciences de l'Ingénieur et des Sciences de l'Homme

Pendant de nombreuses années, la course à la productivité a poussé les services de Recherche et Développement à déployer des procédures de conception permettant de mettre sur le marché plus rapidement un produit plus performant et réalisé à moindre coût. Malheureusement, cette orientation techno-centrée s'est faite au détriment de certaines caractéristiques propres à l'utilisateur, laissant comme seuls critères d'évaluation des produits, les aspects fonctionnels et financiers [NORM 1996].

Le retard méthodologique pris sur l'intégration de disciplines touchant au facteur humain, telles que l'ergonomie ou le design industriel pose des problèmes aux entreprises. En effet, malgré les similarités existantes entre ces différents métiers (méthodologies constituées de phases similaires, structure de chaque phase identique), les approches et les objectifs sont différents d'un acteur à l'autre. De plus, ces acteurs n'ont pas la même philosophie de la conception et se basent sur des formations, des cultures et parfois même du vocabulaire différent, ce qui complexifie considérablement les échanges [GRON 2004] [KVAN 2000].

Cette difficulté de coordination multidisciplinaire s'inscrit au cœur de nos travaux de thèse. Nous posons une première hypothèse de travail selon laquelle, aujourd'hui, une équipe de conception de produits doit être capable d'aborder au cours d'un projet, des notions propres à de multiples métiers permettant de traiter des fonctions techniques mais aussi d'usage et d'estime. Pour cela, elle doit être constituée d'acteurs de la conception spécialisés en ergonomie, en design industriel, en conception mécanique, etc. Cela implique un effort de collaboration qui peut se faire avec l'aide de méthodologies, de méthodes et d'outils dédiés.

La principale difficulté observée vient du fait que ces thématiques de conception centrée sur l'Homme se positionnent au croisement des Sciences de l'Ingénieur et des Sciences de l'Homme. En effet, la recherche de combinaison entre les disciplines qui traitent de l'Homme (l'ergonomie, le

design industriel) et de l'ingénierie de conception mécanique, imposent une approche bilatérale afin de mettre en place des solutions acceptées par chacun des métiers concernés.

Cependant ici, notre approche méthodologique nous place dans un contexte de Sciences pour l'Ingénieur. Dans le cadre de nos travaux, nous souhaitons répondre à la problématique d'intégration de l'ergonomie et du design industriel par le développement de connaissances, de méthodes et d'outils dédiés au concepteur mécanicien. L'enjeu est de comprendre comment on peut atteindre une meilleure collaboration entre les différents acteurs de ces disciplines dans un contexte de conception de produits mécaniques. Ainsi, les travaux touchant notre thématique sont généralement rattachés aux Sciences pour l'Ingénieur via la Mécanique et le Génie Industriel, ou dans des cas plus rares, aux Sciences de l'Homme via la Psychologie pour l'ergonomie et les Sciences de l'Art pour la partie esthétique du design industriel.

3. Positionnement scientifique

Dans le cadre de ces travaux, et en accord avec le contexte industriel et scientifique, nous nous inscrivons dans un modèle de conception centrée sur l'Homme, où l'ergonome, le designer industriel et le concepteur mécanicien sont considérés comme des co-concepteurs spécialistes de leur discipline [SAGO 1999] :

- Le concepteur mécanicien est le concepteur chargé des valeurs techniques du produit. C'est lui qui sera garant de la bonne conception, c'est-à-dire de l'intégration des contraintes techniques d'industrialisation du produit (fiabilité, robustesse, respect des conditions de fabrication, etc.) [ULLM 2003]. Ce rôle peut toucher différents métiers techniques.
- L'ergonome est le co-concepteur chargé de l'ensemble des éléments relatifs à la valeur d'usage du produit, à savoir, la prise en compte des caractéristiques de l'utilisateur en termes physiologiques et psychologiques : anthropométrie, posture, activité, stress, ou encore d'acceptabilité, etc. [JORD 2000].
- Enfin, le designer industriel sera quant à lui le co-concepteur chargé des éléments relatifs à la valeur d'estime du produit. Il s'intéressera en particulier à l'intégration des attentes de l'utilisateur, de la cohérence esthétique, ainsi que des émotions, plaisirs et qualité perçues par l'utilisateur [QUAR 2001].

Nous reviendrons plus largement sur la définition de ces métiers et des tâches qui leurs sont affectées, dans la partie I.3.2.

Dans le cadre de ces travaux, nous faisons le choix de positionner le concepteur mécanicien comme chef de projet chargé de la coordination des acteurs métier, et de la centralisation des

travaux réalisés. En effet, sa formation généraliste et son aptitude à mener un projet jusqu'à l'industrialisation lui permettent de disposer d'une crédibilité de gestion face à toute une équipe de conception.

Nous restons conscients que les designers industriels disposent d'une formation à la gestion de projet créatif. Nous préférons néanmoins poser dans un premier temps une deuxième hypothèse de travail selon laquelle le concepteur mécanicien, spécialiste dans le développement technique des produits mécaniques est le plus à même de conduire un projet jusqu'à l'industrialisation. Ce positionnement nous permettra d'établir une première formalisation méthodologique qui par la suite pourra évoluer si besoin en accord avec les réalités industrielles. Nous reviendrons néanmoins sur la notion de chef de projet et évoquerons une autre notion qui est celle de « leadership ».

Comme nous le verrons par la suite, l'approche de la problématique d'intégration des métiers se fera au travers de notions telles que « Design For Emotions » [NORM 2004] ou « Design For Pleasure » [JORD 2000] et de « Design For Ergonomics » [WEAV, 2000], plus globalement compris dans le « design for X » (DFX) [DAI 2002]. Le DFX représente une suite de techniques de développement de produits qui peuvent être efficacement appliquées dans le processus de conception et qui permettent non seulement la rationalisation des produits, mais également des processus et des systèmes associés [HUAN 1997].

4. Plan de thèse

Dans le **premier chapitre** de cette thèse, nous précisons le contexte de nos travaux de recherche et détaillons le plan du mémoire présenté.

Le **deuxième chapitre** nous permet de définir le processus de conception ainsi que les problématiques liées à l'intégration des métiers.

- Après une première partie d'introduction, une deuxième partie nous permet de définir la **conception** et les méthodologies qui lui sont associées. Nous soulignons en particulier l'**organisation des processus de conception** en abordant les notions de gestion des degrés de liberté, ainsi que les notions de divergence et de convergence. Après un état de la littérature sur la question, nous retenons et détaillons un processus de conception de produits mécaniques.
- Dans une troisième partie, nous relevons les **nécessités d'une approche plurielle de la conception** en nous basant sur la complexité de la prise en compte des **besoins multiples des utilisateurs**. Nous présentons chacun des métiers concernés par nos travaux, à savoir **l'ergonomie, le design industriel, et la conception mécanique** ainsi que l'**organisation des**

équipes projets multidisciplinaires. Nous introduisons ainsi les notions de collaboration, de coopération, de conception concourante, mais aussi de management de projet, et de leadership.

- Dans une quatrième partie, nous nous intéressons à l'**intégration de l'expertise métier de l'ergonome et du designer industriel dans la conception de produits mécaniques**. Pour cela, nous nous appuyons sur le **Design for X**, que nous appliquons à l'ergonomie (Design for Ergonomics) et au design industriel (Design for Aesthetics, Design for Emotion). Cette partie nous permet de présenter les différentes possibilités d'intégration de l'ergonomie et du design industriel. En résulte une problématique de recherche que nous nous proposons d'étudier : les moyens d'améliorer l'intégration de l'ergonomie et du design industriel dans la conception de produits mécaniques nouveaux.
- La cinquième partie nous permet de réaliser une synthèse sur l'état de l'art et de formuler un constat : malgré les méthodes et les outils à disposition des équipes de conception multidisciplinaire, l'intégration de l'ergonomie et du design industriel reste difficile car les méthodologies ne sont souvent pas adaptées aux différences existant entre ces métiers. Sur la base de ce constat, nous positionnons notre recherche et nous définissons une **première hypothèse de recherche** qui consiste à supposer que **la collaboration et la coopération entre les acteurs de la conception peut être favorisée par le biais d'une méthodologie globale de conception qui intègre la spécificité de chaque métier concerné (pour nous, l'ergonomie, le design industriel et la conception mécanique), ainsi que les interactions multidisciplinaires existant entre ces métiers tout au long du processus de conception de produits mécaniques.**

Le **troisième chapitre** propose de vérifier et de valider cette hypothèse de recherche par la proposition et la mise à l'épreuve d'une méthodologie de conception de produits mécaniques.

- Après une introduction des objectifs du chapitre, la deuxième partie fera l'objet d'une **présentation de la méthodologie multidisciplinaire** que nous proposons. Nous présentons le modèle ainsi que le rôle de chacun des acteurs considérés.
- Dans une troisième partie, nous présentons une **mise à l'épreuve de cette méthodologie** sur un projet Inter-Régional Franco-Suisse traitant de la conception de mobilier urbain et des thématiques d'intégration de l'ergonomie et du design dans la ville. Cette mise à l'épreuve nous permet de mettre en évidence les points forts et les verrous méthodologiques à approfondir dans le cadre de nos travaux, notamment dans les phases de convergence multidisciplinaire entre les métiers d'ergonomie, de design industriel et de conception mécanique.

- Dans une quatrième partie, nous présentons un **focus expérimental sur les interactions multidisciplinaires** observées durant un projet de conception de produits et une caractérisation de ces interactions afin d'enrichir notre méthodologie.
- Enfin, dans une cinquième partie, nous concluons sur l'approche méthodologique de notre sujet et ouvrons la voie à une discussion portant sur la problématique d'intégration de l'ergonomie et du design industriel, par le concepteur mécanicien, dans le processus de conception : comment peut-on faciliter les phases de convergences multidisciplinaires ? Dans cette discussion, nous positionnons les Formalisations Intermédiaires comme une réponse possible à cette problématique. Nous étudions en particulier l'utilisation de la Réalité Virtuelle comme support des Formalisations Intermédiaires. Cette discussion nous amène à notre **deuxième hypothèse de recherche** qui souligne que **le développement de nouveaux outils d'aide à la conception multidisciplinaire et de Formalisations Intermédiaires, basés notamment sur les technologies de réalité virtuelle, permettent une meilleure gestion des phases de convergence.**

Le **quatrième chapitre** propose une approche expérimentale opérationnelle, durant laquelle nous mettrons à l'épreuve cette deuxième hypothèse de recherche.

- Après une introduction et un rappel de notre problématique, nous présentons en deuxième partie une expérience visant à **positionner la Réalité Virtuelle comme support de Représentations Intermédiaires de Conception** dans un projet de conception d'un petit véhicule urbain (F-City). L'approche multidisciplinaire de ce projet nous permet de déployer notre méthodologie et d'observer une amélioration des pratiques et des résultats, grâce à la Réalité Virtuelle. Les résultats et discussions nous permettent de confirmer l'intérêt de la Réalité Virtuelle dans la phase de développement technique du processus de conception multidisciplinaire.
- Dans une troisième partie, nous présentons une deuxième expérience qui s'intéresse plus précisément à la **convergence Design Industriel – Conception Mécanique tout au long d'un processus de convergence assisté par la Réalité Virtuelle**. Cette proposition est appliquée à la conception d'un produit industriel. Les résultats obtenus nous permettent de mettre en évidence l'intérêt des technologies de Réalité Virtuelle dans ce type de convergence.
- La quatrième partie nous permet de conclure sur cette approche expérimentale opérationnelle de nos travaux, et d'entamer des discussions sur les enjeux de la Réalité Virtuelle dans les processus de conception et en particulier dans les processus de convergence multidisciplinaire. Cette discussion nous permet de proposer **une généralisation de nos travaux à travers une méthodologie de convergence multidisciplinaire**.

Le **cinquième chapitre** expose la contribution finale de nos travaux de thèse. Cette contribution se traduit par **une approche méthodologique de la convergence multidisciplinaire**, dont l'objectif est de structurer le processus de convergence et de mettre en avant certains outils d'aide à la convergence, tels que la Réalité Virtuelle. Cette approche se fait en trois niveaux d'analyse :

- Le premier niveau concerne la **définition de la convergence dans un processus de conception**. Une procédure générique nous permet de mettre en avant les différentes étapes de ce processus et de structurer un premier cadre méthodologique.
- Le deuxième niveau nous permet de présenter un **modèle de convergence multidisciplinaire.** Nous présentons en particulier les spécificités de chaque type de convergence.
- Enfin, nous présentons une **première proposition de Méthodologie de convergence multidisciplinaire**. Cette proposition se structure selon trois phases : préparation, réalisation et validation.

Le **sixième chapitre** permet de souligner les apports scientifiques de nos travaux sur l'articulation de l'ergonomie, du design industriel et de la conception mécanique, et de discuter des limites et des perspectives de recherche sur l'approche méthodologique de la convergence multidisciplinaire.

CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

1. Introduction

Le présent chapitre se propose de présenter notre problématique de recherche liée à la conception de produits mécaniques ainsi qu'aux moyens de prise en compte de l'ergonomie et du design industriel.

Pour cela, nous présentons dans une **deuxième partie** une définition et différentes notions concernant l'intégration des métiers dans la conception, telles que la gestion des degrés de liberté, ou les phases itératives de divergence et de convergence. Nous mettons ensuite en évidence différentes approches du processus de conception.

Dans une **troisième partie**, nous insistons sur la nécessité d'une approche plurielle de la conception de produits mécaniques. Nous définissons différents besoins (d'usage, d'estime, techniques) et présentons les métiers qui permettent de les étudier et d'y répondre. Nous présentons ces disciplines dites « carrefour », telles que l'ergonomie ou le design industriel. Enfin, nous présentons l'organisation d'une équipe projet multidisciplinaire en soulignant en particulier la distinction entre gestion de projet et leadership.

La **quatrième partie** de ce chapitre nous permet de faire le point sur les méthodes d'intégration des différentes disciplines dans le processus de conception. Nous traitons en particulier de la notion de Design For X (conception en vue de X) et son application à l'ergonomie (Design for Ergonomics) et au design industriel (Design for Emotion / Design for Aesthetics). Nous mettons ainsi en évidence que malgré les méthodes et outils existant, les collaborations entre ces métiers dans un contexte de conception mécanique restent difficiles.

Sur ce constat, après avoir synthétisé notre problématique de recherche, nous présentons dans la **cinquième partie** notre première hypothèse de recherche.

2. Le Processus de conception de produits mécaniques

2.1. Conception et résolution de problème

2.1.1. Généralités et définitions

L'activité de conception est définie par Suh comme la discipline qui étudie les interactions entre « ce que l'on veut accomplir » et « comment on veut l'accomplir » [SUH 1990]. Le but est d'atteindre, selon une demande précise, un objectif satisfaisant la demande. D'autre part, de nombreux auteurs, tels que Simon, comparent la conception à un système de résolution de problème [SIMO 1973]. En effet, son objectif est de transformer un état initial problématique (dû à un manque ou à une

inadéquation entre un besoin et une solution existante), en un état final ciblé considéré comme optimal, et où le problème est comblé par la nouvelle solution. Cette approche permet d'exploiter l'ensemble des travaux sur les systèmes de résolution de problème pour la conception.

La norme ISO 9000:2005 définit la conception et le développement de produits comme un ensemble de processus qui transforme des exigences en caractéristiques spécifiées ou en spécification d'un produit, d'un processus ou d'un système. Il est précisé que les termes « conception » et « développement » sont parfois utilisés comme des synonymes et parfois utilisés pour définir des étapes différentes du processus global avec la conception en amont, puis le développement en aval [ISO 9000:2005].

2.1.2. Notion de degré de liberté

L'une des notions les plus étonnantes de la conception pourrait être la notion de degré de liberté, liée au paradoxe de la conception, qu'Ullman définit par la phrase suivante : *« Plus vous apprenez, moins vous avez la liberté d'utiliser ce que vous savez »* [ULLM 2003]. Ce paradoxe met en évidence le fait que le problème, peu connu en phase amont, est découvert au fur et à mesure du développement du projet, et qu'*a contrario*, les marges d'action sont plus fortes dans les phases amont, ce qui signifie que c'est lorsqu'on ne connait pas encore totalement le problème, qu'on a la plus grande marge de manœuvre pour définir le produit futur. En accord avec Schön [SCHO 1983] et Visser [VISS 2002], Lonchampt caractérise ainsi le problème de conception comme un problème mal défini par nature [LONC 2003].

Cette notion de liberté en conception est décrite par Pahl et Beitz [PAHL 1996] ainsi que par Ullman [ULLM 1997, 2003], qui propose une schématisation du rapport entre « connaissance du problème de conception » et « liberté de conception », en fonction des étapes du processus de conception. Ce schéma (voir Figure 1) met en évidence que durant les phases amont, la connaissance du problème est très faible et la liberté d'action en conception est grande, et qu'au cours de l'avancement du projet de conception, la connaissance du problème grandit, alors que la liberté diminue.

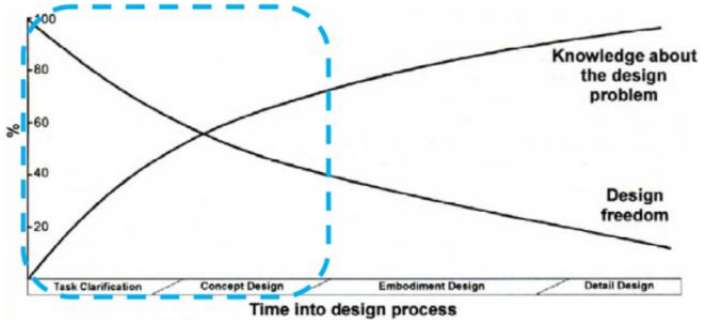


Figure 1 : Représentation schématique du rapport « connaissance du problème / liberté d'action » [ULLM 1997]

De la même manière, Zeiler montre que l'influence d'une information sur l'objet conçu évolue tout au long du processus, mais son impact est à son maximum dans les phases amont du processus [ZEIL 2007].

De par leur grande liberté d'action, les phases amont sont plus propices à une intervention sur le futur des produits. Elles sont aussi, de par leur influence sur l'ensemble du projet de conception, extrêmement stratégiques car elles supportent un enjeu qui engage la réussite du projet de conception et la qualité du produit conçu. En effet, les phases amont représentent environ 20% des dépenses totales du projet de conception. Pourtant, les décisions prises durant ces mêmes phases engagent 80% des dépenses totales du projet [PETI 1991] [GIRA 2001]. Ainsi, toute intervention sur l'objet conçu, aura plus d'impact dès lors qu'elle peut se faire tôt dans le processus.

De nombreux auteurs insistent sur le fait que dans les phases amonts (souvent nommées Fuzzy Front End – FFE), les connaissances[1] et les compétences[2] des concepteurs s'avèrent cruciales [KOEN 2001, 2002] [HUGI 2003].

2.1.3. Notion de divergences et de convergences

En conception, tout comme dans un système de résolution de problème, il est possible d'observer un enchainement de phases de recherche, et de phases de prises de décision. Ces phases peuvent être décrites comme des phases de divergence durant lesquelles des idées naissent, des possibilités apparaissent et sont traitées, et des phases de convergence durant lesquelles ces propositions sont évaluées, sélectionnées puis optimisées [VAN 2001]. Van der Lugt formalise cet enchainement de divergence-convergence selon la Figure 2. Nous pouvons observer un élargissement durant la phase divergente, avec une interprétation du problème et une génération d'idées de solutions. Durant cette phase, de nombreuses propositions sont formalisées, répondant partiellement ou intégralement à la problématique initiale. Ensuite, la phase de convergence constitue une période d'évaluation et de mise à l'épreuve des solutions proposées. De nombreuses propositions sont mises à l'écart, et les meilleures idées sont combinées afin d'atteindre une ou plusieurs solutions viables.

[1] Une connaissance est une combinaison d'une information et d'une interprétation humaine. [MACK 1995]

[2] La compétence est une caractéristique de l'individu. Elle agrège des savoir-faire et des savoir-être, et est indissociable de l'activité par laquelle elle se manifeste. [OIRY 1995]

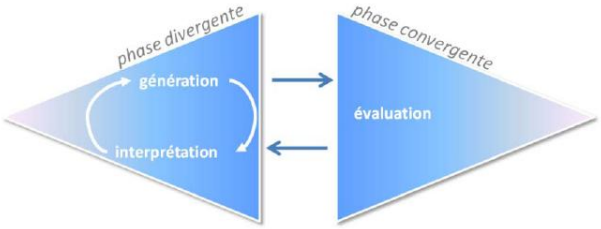


Figure 2 : Modèle de Divergence - Convergence [VAN 2001]

Asimov ajoute dans ce processus une troisième phase intermédiaire : la phase de transformation, qui permet de passer de la divergence à la convergence (flèches représentées par Van der Lugt sur la figure 2) [ASIM 1962].

Le Design Council, agence gouvernementale promouvant la conception au Royaume-Uni, introduit lui aussi ces notions de divergence et convergence à travers son modèle nommé « double-diamond » [DESI 2007]. Ce modèle permet de mettre en évidence des divergences et convergences successives, nous permettant d'aborder la notion d'itérations. Buxton, en s'appuyant sur les travaux de Pugh [PUGH 1990], souligne lui aussi cette notion de divergences et convergences itératives (nommées Générations Contrôlées et Convergences Contrôlées) et les combine avec les degrés de liberté en conception évoqués précédemment [BUXT 2007]. Ainsi, la première divergence procure un très grand nombre de propositions, puis les convergences et divergences itérées entrainent le projet de conception vers une unique solution retenue, considérée comme optimale car ayant validé l'ensemble des évaluations successives.

Les phases de divergence ne sont généralement pas spécifiquement structurées, mais elles sont accompagnées de méthodes de génération d'idées, et de créativité [TASS 2009]. Le processus de convergence tend quant à lui, à se rapprocher du processus de prise de décision décrit par Highsmith. Ce processus se compose de 3 phases : définition des facteurs d'impact et des enjeux, action de prise de décision, validation du choix et mise en œuvre [HIGH 2004].

2.2. Les méthodologies et processus de conception

Les projets de conception sont systématiquement pilotés par une démarche de conception dont le but est de structurer un ensemble de méthodes et d'outils afin d'atteindre les objectifs ciblés. Cette démarche, ou méthodologie, est un référentiel pour tous les concepteurs prenant part au projet, et se veut adaptée au contexte de conception.

2.2.1. Méthodologies prescriptives et descriptives

Régulièrement, nous pouvons lire les notions de prescriptive ou descriptive pour caractériser une méthodologie de conception. Selon Dessus, une approche descriptive est issue de l'observation de la situation ou de l'activité mise en œuvre par des sujets, en identifiant leurs caractéristiques et leurs

conditions d'apparition ou de changement. L'approche prescriptive consiste quant à elle à préconiser une situation optimale, ou encore l'activité que les sujets devraient mettre en œuvre, compte tenu de la situation. [DESS 2002]. Dans un contexte de méthodologie de conception, cela pourrait se traduire par la définition suivante : Les **méthodologies prescriptives** se basent sur les procédures à suivre afin de définir le processus de conception. Les **méthodologies descriptives** se basent sur les activités des concepteurs afin de définir le processus de conception.

Quelle que soit l'approche considérée, il n'existe pas un processus de conception universel et unique mettant en accord l'ensemble des acteurs scientifiques et industriels de la discipline, et ce malgré les moyens publics et privés déployés depuis les années 50 [CLAR 2005]. Nous pourrons néanmoins retenir la définition de Best qui définit le processus de conception comme *« un enchainement spécifique d'événements, d'actions ou de méthodes, par lesquels une procédure ou un ensemble de procédures sont suivies, afin d'atteindre un objectif, un but ou un résultat. »* [BEST 2006].

De multiples approches pour définir et formaliser le processus de conception sont depuis plusieurs décennies, développées par de nombreux auteurs. Scaravetti [SCAR 2004] et Howard [HOWA 2008] synthétisent un grand nombre de méthodologies de conception depuis Booz *et al.* en 1967 jusqu'au Design Council, qui diffuse encore aujourd'hui son modèle de conception.

Il en ressort plusieurs points communs :

Le premier est que tous les auteurs s'accordent à définir le processus de conception comme un cycle constitué de plusieurs phases relativement similaires d'une méthodologie à l'autre : l'étude des besoins, la recherche de solutions, le développement d'une solution et enfin la validation du produit.

La deuxième concordance se situe au niveau des formalisations intermédiaires de l'objet conçu. De nombreux auteurs structurent le processus autour de plusieurs formalisations de l'objet conçu : la définition des besoins, les concepts proposés, la solution, le prototype, etc. [WILS 1980] [RAY 1985] [BAXT 1995] [BLAC 1999] [BRET 2000] [DIET 2000] [DESI 2007]. D'après Ullman [ULLM 2003], la conception peut être considérée comme une évolution de l'état du produit conçu.

Enfin, certains auteurs structurent le processus à partir de différents jalons de définition de l'objet conçu, plus ou moins précis en fonction de l'état d'avancement du projet. Quarante propose par exemple trois jalons : Le cahier des charges conceptuel, le cahier des charges fonctionnel, puis le cahier des charges techniques, ce qui permet d'entrer peu à peu dans une définition industrielle des produits [QUAR 2001]. D'autres auteurs vont dans ce sens, ajoutant des cahiers des charges spécifiques à chaque métier [AOUS 1994] [QUAR 2001] [FANC 1994] [AFAV 1994] [CAVA 1995] [PAHL 1996] [BNAE 1999] [BUXT 2007].

2.2.2. Processus retenu et détail des phases

Le processus de conception que nous retenons est, en accord avec Suh, similaire à un processus de résolution de problème [SUH 1990]. En ce sens, il est composé de cinq phases : 1. Connaître et comprendre les besoins du client ou de l'utilisateur ; 2. Définir et formaliser le problème à résoudre pour satisfaire les besoins ; 3. Rechercher les solutions répondant au problème ; 4. Développer la meilleure des solutions proposées ; et enfin 5. Vérifier le résultat obtenu selon les besoins initiaux.

1) Connaître et comprendre les besoins du client ou de l'utilisateur

La première phase du processus de conception réside dans la mise en évidence des besoins de l'utilisateur futur du produit. Cette étude des besoins est une phase extrêmement sensible car c'est de celle-ci que va dépendre l'ensemble du projet de conception.

Dans un premier temps, il est nécessaire de décrire une situation problématique existante, venant d'un manque ou de l'inadaptabilité des produits existants pour répondre à une nécessité ou une envie des utilisateurs. Durant cette phase, la définition de la cible des utilisateurs est elle aussi primordiale. Une mauvaise définition de ces deux premiers éléments peut entrainer une mauvaise solution apportée, et donc un échec du projet de conception.

De plus, cette phase de définition des besoins permet aussi de définir les besoins logistiques nécessaires à la conception du produit, en termes de temps, de moyens humains et matériels. Durant cette phase, une planification du processus peut être réalisée afin de préparer au mieux le projet, comme le propose par exemple l'Agence Française de l'Analyse de la Valeur (AFAV) avec l'analyse des risques, et l'évaluation globale des coûts et délais [AFAV 1994], ou comme le préconise le Design Council avec la planification de la création du groupe de conception [DESI 2007].

2) Définir et formaliser le problème à résoudre pour satisfaire les besoins

Une fois que les besoins ont étés ciblés, il est important de pouvoir les figer à travers une formalisation universelle que chaque acteur de la conception pourra considérer comme un élément de référence. Cette formalisation est régulièrement appelée Cahier des Charges. Il est généralement constitué de fonctions qui traduisent les besoins et fixent les objectifs de conception. Ces fonctions peuvent cibler des objectifs précis quantifiés (longueurs, poids, etc.), ou qualifiés (couleurs, textures, etc.). Tout au long du processus de conception, il apparait comme un véritable outil d'aide à la décision et permet d'ajuster certaines propositions ne répondant pas intégralement aux besoins.

On pourra noter que la littérature française a tendance à caractériser ce cahier des charges voire même à en proposer plusieurs : Cahier des Charges Conceptuel, Fonctionnel, Technique, Concepteur [AOUS 1994] [QUAR 2001] [FANC 1994] [AFAV 1994] [BRET 2000]. Ces multiples approches du cahier

des charges correspondent à ses différents usages ainsi qu'à la multidisciplinarité de la conception. En effet, chaque concepteur aura ses propres méthodes de formalisation d'un problème de conception.

3) Rechercher les solutions répondant au problème

Parfois nommée recherche créative, recherche conceptuelle ou conception générale (Conceptual Design), la phase de recherche de solutions consiste à explorer tous les champs de solutions possibles répondant partiellement ou totalement au problème posé et formalisé dans le cahier des charges. L'aboutissement de cette phase est la mise en évidence de plusieurs concepts plus ou moins aboutis, qui permettront une sélection en vue de développement.

4) Développer la meilleure des solutions proposées

Une fois la meilleure solution ciblée et sélectionnée en accord avec l'ensemble des acteurs de la conception, il faut la développer pour la rendre viable techniquement et industriellement afin de transformer le concept en produit. Cette phase voit naitre les définitions du produit industriel.

5) Vérifier le résultat obtenu selon les besoins initiaux

Une fois le produit industriel abouti, la dernière phase du projet de conception vise à valider le résultat obtenu en le formalisant (modèle numérique, prototype, etc.) et en le confrontant au cahier des charges traduisant le besoin initial, voire même en l'expérimentant auprès d'utilisateurs potentiels afin d'évaluer le taux de satisfaction du produit.

L'ensemble de ces phases est formalisé sur la figure 3. Cette illustration s'organise selon une démarche séquentielle afin d'en faciliter la lecture. Nous verrons par la suite que les processus de conception sont aujourd'hui simultanés.

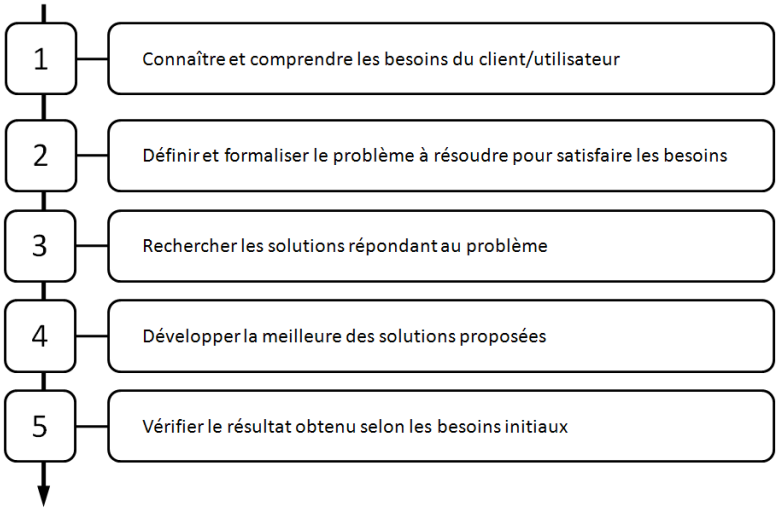


Figure 3 : Phases du processus de conception selon Suh [SUH 1990]

3. La nécessité d'une approche plurielle

3.1. Des besoins multiples

La complexité de la conception des produits qui nous entourent vient du fait qu'ils répondent à un grand nombre de besoins. Le terme « besoin » apparaît au pluriel car il existe différents besoins : ils peuvent être liés à l'utilisation du produit, à l'utilisateur, ses caractéristiques, ses capacités d'action, mais aussi à des notions plus abstraites, telles que son plaisir ou l'adéquation culturelle [BRAN 2003]. Le produit doit aussi répondre à certaines exigences commerciales, stratégiques ou techniques (charte graphique, outillage de fabrication, etc.).

Dans le cas de la conception d'un *stylo*, exemple repris par de la Bretesche, dans la méthode APTE [BRET 2000], on peut définir un besoin global qui est de *laisser une trace sur un support*. C'est le besoin qui répond le plus directement à la question « à quoi va servir le produit ? ». Mais ce besoin exprimé n'est qu'une facette de l'ensemble des besoins nécessaires à l'initialisation du projet de conception. En effet, il est nécessaire de regarder plus loin pour cerner de la manière la plus complète possible le problème à résoudre. Pour cela, des questions plus précises vont intervenir : « à qui va servir le produit ? », « dans quelles conditions le produit va-t-il fonctionner ? », etc.

Ainsi, pour un stylo, le besoin principal exprimé étant de laisser une trace sur un support, il existe de nombreux autres besoins souvent non-exprimé par l'utilisateur, qui n'en perçoit parfois pas la pertinence. On peut par exemple évoquer la position du stylo sur le marché : l'utilisateur a-t-il besoin d'un stylo de luxe, bon marché, ou disposant d'un style spécifique ? Il lui faudra aussi un certain nombre de fonctionnalités qui restent à définir (mine rétractable, crochet, capuchon, etc.).

Une fois les grandes lignes de l'étude des besoins définies, il faut en étudier les moindres détails car un besoin exprimé n'est pas toujours complet. Il arrive parfois même d'être détourné par l'utilisateur qui pense avoir certains besoins et qui en fait en a d'autres.

L'étude complète de ces besoins est indispensable afin de garantir une réponse bien ciblée et garantissant une satisfaction totale. Cette étape complexe est décisive car elle permet de définir le futur du produit souhaitable et de rédiger le cahier des charges afin de permettre sa conception. Un besoin mal étudié met en danger la conception du produit [SUH 1990].

Dans le cadre de nos travaux, et en accord avec De La Bretesche [BRET 2000] et Quarante, [QUAR 2001] nous considérons deux types de besoins :

- Les besoins relatifs à l'humain, qu'il soit utilisateur final ou non, en termes de sécurité, de confort, de plaisir, d'émotion, de satisfaction, etc.

- Les besoins relatifs au produit, en termes de fabricabilité, de viabilité du projet de conception et de développement, mais aussi de robustesse, de respect des normes et de l'environnement, etc.

En nous appuyant sur les travaux de l'équipe ERCOS du laboratoire Systèmes et Transports de l'IRTES-UTBM [SAGO 1996, 1999] [MAHD 2007b], nous définissons les besoins propres à l'utilisateur selon deux terminologies : les besoins d'usage et les besoins d'estime.

Ces notions d'usage et d'estime, relatives à l'être humain, sont régulièrement énoncées comme part importante de la conception d'un produit. Dans son ouvrage *« élément de design industriel »*, Quarante les introduit dans un chapitre dédié aux fonctions des produits [QUAR 2001]. Nous notons qu'une fonction est une traduction du besoin en langage métier. D'après l'auteur, un produit répond à des fonctions de service (d'usage, d'estime), et des fonctions contraintes (techniques). En nous appuyant sur la méthode QFD (Quality Function Deployment) établissant un lien étroit et direct entre les besoins du client et les fonctions d'un produit [BERG 1996], nous définissions le lien entre ce que nous appelons « besoins d'usage » et « besoins d'estime » et les fonctions d'usage et d'estime évoquées par Quarante.

3.1.1. Les besoins d'usage

En accord avec Brangier, nous définissons les **besoins d'usage** comme l'ensemble des besoins permettant à l'utilisateur d'accomplir un objectif au travers d'une activité réelle dans un contexte donné [BRAN 2003].

Cette définition s'accorde avec celle de Macinnis & Jaworski qui évoquent la notion de besoins dits « utilitaires » dans un contexte marketing [MACI 1989]. Ces besoins s'étendent jusqu'à l'utilité du système conçu ainsi qu'aux procédures d'utilisation, à l'utilisabilité, et à l'acceptabilité du produit. Nous définissons ces diverses notions de la manière suivante :

- L'**usage** est défini par Brangier comme la mise en activité effective d'un objet dans un contexte social. L'utilisateur, les tâches qui lui incombent, et l'environnement dans lequel il évolue, constitue le contexte social et impliquera divers usages du produit. [BRAN 2003]
- L'**utilité** correspond à la capacité d'un dispositif technique de répondre aux besoins réels des utilisateurs, c'est donc la capacité de l'objet à aider à l'accomplissement d'une activité humaine. Elle constitue généralement la motivation initiale de l'acte d'achat. [LOUP 2010]
- L'**utilisation** est le processus par lequel une personne utilise un produit, c'est donc l'action attachée à l'usage d'un produit ou d'un service. [BRAN 2003]
- La **fonctionnalité** définit l'appropriation exacte de l'objet à un but utilitaire. [BRAN 2003]

- L'**utilisabilité** correspond au degré selon lequel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié [ISO 9241:1998].
- L'**acceptabilité** est définie selon deux catégories : l'acceptabilité pratique, qui englobe des caractéristiques telles que la fiabilité, les performances ou l'utilité (usefulness), et l'acceptabilité sociale. Pour Nielsen, l'acceptabilité pratique peut être divisée ensuite en une utilité et une utilisabilité. Selon lui, l'ergonome ne se cantonne pas aux critères d'utilisabilité d'un système, mais en étudie aussi l'utilité par rapport à un besoin d'usage [NIEL 1994].

3.1.2. Les besoins d'estime

La définition retenue des **besoins d'estime** considère les besoins relatifs à la valeur d'estime abordée dans le chapitre 1 (§1, page 11), à savoir *la considération affective que l'utilisateur attache au produit lors de son achat ou de son utilisation*.

En effet, nous avons pu voir qu'au-delà de la volonté de répondre à des besoins d'usage, les produits doivent aujourd'hui intégrer d'autres composantes plus subjectives, telles que les désirs (et les attentes, exprimés ou non) de leurs utilisateurs. Ainsi pourront être considérées comme des besoins d'estime les notions telles que la qualité perçue, les modes et tendances, ou la valeur sentimentale. L'esthétique est elle aussi considérée comme une part important des besoins d'estime. En effet, comme le souligne Loewy dans son ouvrage réédité de 1953 *« la laideur se vend mal »*, l'esthétique d'un produit est un atout prédominant sur les marchés concurrentiels d'aujourd'hui [LOEW 1990]. De nombreux auteurs évoquent la notion de plaisir dégagé par le produit chez l'utilisateur, comme un atout commercial indispensable [NORM 2003] [JORD 1998] [BOUC 1997] [BASS 1996]. L'approche est complexe car s'emmêlent des concepts tels que la perception multi-sensorielle, l'image de marque, les stratégies commerciales, et nécessite l'intervention de métiers spécialisés dans les relations produits-humains. Ainsi, des disciplines telles que le marketing, la sociologie, la psychologie, viennent appuyer le travail des concepteurs.

3.1.3. Les nécessités techniques

Nous définissons les **nécessités techniques** ou contraintes techniques, comme un ensemble d'éléments techniques indispensables à la mise au point d'un produit industrialisable, découlant directement des besoins d'usage et d'estime.

Ces nécessités se traduisent par des données internes au projet (car ne dépendant pas directement de l'utilisateur) et sont régulièrement considérés comme des contraintes de conception secondaires [BRET 2000]. Cette catégorie de besoins pourra concerner le fonctionnement du produit,

les technologies déployées, les contextes de conception d'un point de vue logistique et organisationnel, mais aussi le contexte industriel de réalisation et de mise en vente du produit.

Plus concrètement, les nécessités techniques proviennent dans la majeure partie du temps d'une traduction *a priori* des besoins de l'utilisateur en « langage concepteur » [ULLM 2003]. Les grandes lignes de ces contraintes techniques apparaissent dans le cadre de la rédaction du Cahier des Charges [QUAR 2001], même si des consignes techniques peuvent être établies dès la phase d'étude des besoins initiaux, dans le cadre de la conception d'un produit client (sur commande par exemple).

3.2. La conception : un carrefour de disciplines

La conception est définie par Lonchampt [LONC 2003] comme un problème dont la résolution est collective. En effet, nous avons pu voir qu'il existait un grand nombre de besoins différents et qu'une approche multiple était indispensable pour tous les traiter. Tout comme Lonchampt, nous nous positionnons dans un cadre de conception industrielle (par opposition à une conception artisanale, dans laquelle l'artisan est le seul acteur impliqué dans la conception du produit). Dans ce contexte, la conception est aujourd'hui l'œuvre de plusieurs acteurs différents, issus de différents métiers. Ce partage des tâches entre plusieurs experts est décrit par Midler dans le modèle d'ingénierie [MIDL 1998]. Ces experts contribuent ensemble à la résolution du problème de conception, ils partagent un but commun qui est celui d'aboutir à la définition d'un produit satisfaisant pour tous. Cela implique donc une collaboration étroite des métiers de la conception [PRUD 2003]. Duchamp décrit ces métiers en évoquant les expressions de disciplines « classiques », « nouvelles » et « carrefours », à savoir des disciplines spécialisées dans un domaine précis, mais intervenant dans un processus transversal de conception [DUCH 1999]. Les disciplines classiques concernent l'ensemble des sciences de l'ingénieur (mécanique, informatique, électronique, science des matériaux, etc.). Les disciplines nouvelles sont des disciplines enseignées dans le cadre de formation d'ingénieur, et relative à la sécurité, la qualité ou la fiabilité. Enfin, Duchamp introduit le terme de disciplines carrefours en parlant des métiers plus éloignés des sciences de l'ingénieur, et touchant davantage au facteur humain et aux sciences humaines et sociales. Il cite notamment le marketing, le design, la créativité, ou encore l'ergonomie.

La difficulté est que ces disciplines extrêmement éloignées viennent, au cours des projets de conception de produits mécaniques, à se croiser avec un objectif commun : aboutir à un produit unique satisfaisant pour tous. Ainsi, ces rencontres de cultures et de métiers différents permettent de répondre à des besoins d'ordre technique, mais aussi et surtout de répondre aux besoins de l'Homme qui utilisera le produit. Aoussat formalise ces rencontres selon la schématisation présentée sur la Figure 4. Le principe est que chaque acteur dispose d'un domaine d'expertise [AOUS 1990]. Ces

domaines, tels que l'ergonomie, le design industriel, la qualité, le marketing, présentés comme indépendants, rencontrent l'activité de conception de produits nouveaux. Ces points de rencontre impliquent une nécessité d'exporter son expertise en dehors de son domaine pour la partager avec d'autres experts.

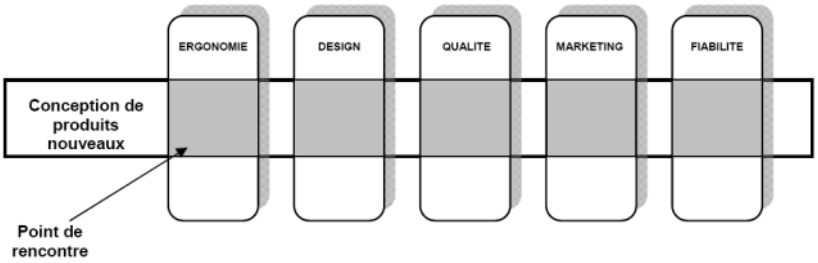


Figure 4 : Rencontres des disciplines carrefours [AOUS 1990]

Nous retenons la définition de l'expert énoncée par Ericsson: l'expert est celui qui a acquis des compétences spéciales ou des connaissances d'un sujet particulier par la formation professionnelle et l'expérience pratique. L'expertise métier est le potentiel d'action dont dispose cet expert métier. [ERIC 1999]

Afin de positionner notre recherche dans le cadre d'une conception centrée sur l'homme, nous détaillons les trois métiers que nous considérons, à savoir les métiers d'ergonome et de designer industriel, experts des éléments relatifs à l'homme en termes de besoins d'usage et d'estime, ainsi que le métier de concepteur mécanicien, chargé du projet de conception d'un produit industrialisable intégrant l'usage et l'estime ciblés.

3.2.1. L'ergonomie

Introduite au milieu du 19^{e} siècle, l'ergonomie, du grec Ergon (travail) et Nomos (loi) est une discipline scientifique relative à la science du travail.

Depuis plus d'un siècle, de nombreuses organisations se sont structurées pour promouvoir l'ergonomie. Parmi elles, l'International Ergonomics Association (IEA) propose une définition de la discipline, que nous retiendrons pour la suite de nos travaux : « *L'ergonomie est la discipline scientifique qui concerne la compréhension des interactions entre les humains et les autres éléments d'un système, ainsi que le métier qui applique la théorie, les principes, les données et les méthodes à la conception afin d'optimiser le bien-être humain mais aussi les performances générales du système* » [IEA 2012]. Cette discipline tend donc à permettre une intégration des caractéristiques humaines (dimensions anthropométriques, capacités physiologiques et psychologiques, etc.) et à veiller à leur prise en compte tout au long du processus de conception et de développement des produits.

La majeure partie des activités de l'ergonome constitue ce qu'on appelle l'ergonomie de correction et qui consiste à détecter un problème sur un produit existant ou une situation existante. Dans un contexte de conception, l'ergonome peut s'orienter vers une ergonomie de conception, dont l'objectif est d'intégrer durant le processus de conception et de développement du produit, la composante humaine. Brangier propose le terme d'ergonomie prospective, qui consiste en la prise en compte de l'ergonomie durant les phases de recherche de solution [BRAN 2010].

Dans un contexte de conception de produit, Daniellou définit le rôle de l'ergonome de la manière suivante : « L'ergonome attire l'attention des concepteurs sur certains enjeux du projet, sans préjuger des solutions qu'ils élaboreront ; il s'agit notamment de signaler des formes de variabilité probables dans le futur système, et de transmettre la liste des situations d'actions caractéristiques que les opérateurs auront à gérer » [DANI 2004].

Dans nos travaux, l'ergonome sera le co-concepteur chargé des notions d'usage, depuis l'étude des besoins d'usage jusqu'à leur validation au niveau des solutions.

3.2.2. Le design industriel

A la Renaissance, le disegno est un des courants italiens les plus importants de la théorie de l'art. Il peut à la fois être traduit en « dessin » et en « projet ». Au 17^{e} siècle en France, des théoriciens de l'art le traduisent par « dessein » et conservent le double sens (l'idée et sa représentation). C'est en 1712 que le terme « design » fait sa première apparition afin d'enrichir le langage des artistes (*drawing* signifie le dessin au sens du tracé physique, et *design* signifie le dessein au sens idée et représentation physique ou non) [SHAF 1712].

Sur un plan scientifique, de nombreux auteurs [KATT 2006] [MANT 2003] [SIMO 1973] [BOUC 1997] énoncent comme référence la définition retenue par l'International Council of Societies of Industrial Design, considérant le design comme *une activité créatrice dont le but est de déterminer les qualités formelles des objets produits industriellement (les qualités formelles correspondent aux qualités extérieures, mais aussi et surtout aux relations structurelles et fonctionnelles qui font de l'objet une unité cohérente)*. Dans le cadre de cette définition, le designer tend à intervenir tout au long du processus de conception et de développement du produit afin de garantir le maintien de cette cohérence. Pour cela, le designer peut être amené à intervenir sur l'ensemble de ses composantes, touchant à la fois à sa géométrie, sa structure, sa fonction, ses mouvements, et ses propriétés physiques. Gaté indique à ce propos que le designer se doit d'être généraliste et de maitriser autant les techniques de dessin et de prototypage que les cadres théoriques de la mécanique et des matériaux par exemple [GATE 1998].

D'autres auteurs nuancent cette approche et ne reconnaissent pas cette intervention du designer sur toutes les phases du processus. Ils tendent à réduire son activité à celle d'un créateur, qui n'intègre pas toujours dans ses œuvres, les composantes techniques [PATE 2010]. Le design devient une discipline au croisement de l'art et de la conception. Ces mêmes auteurs introduisent la notion de design dit « industriel », beaucoup plus tourné vers les enjeux techniques d'industrialisation des produits. Sans disposer des mêmes compétences techniques que le concepteur mécanicien, le designer industriel est donc chargé de mieux appréhender les aspects techniques et surtout de mieux connaître et comprendre les ingénieurs et techniciens chargés du développement technique et de la réalisation des produits.

Pour autant, ces définitions sont propres à la vision « française » de la discipline de design. En ce qui concerne la vision anglo-saxonne, le terme « designer » regroupe l'ensemble des créateurs et concepteurs [LEMA 2010]. Les concepteurs des aspects relatifs à l'Homme sont nommés *« industrial designers »* alors que les concepteurs internes aux bureaux d'études et chargés des aspects techniques sont nommés *« engineering designers »*. De plus, nous notons qu'en anglais, le terme « design » se retrouve très régulièrement attaché à un qualificatif (« *industrial design* », « *aesthetic design* » [CHEU 2005], *« emotional design »* [NORM 2004]).

Dans le cadre de nos travaux, nous retenons la définition de Paternotte et considérons le designer dit industriel, au croisement des aspects esthétiques du produit et de son caractère industrialisable. Avec l'aide du concepteur mécanicien, le designer industriel sera chargé d'atteindre un résultat attractif pour l'utilisateur, touchant à ses émotions et son plaisir. En accord avec notre positionnement, nous considérons que le designer industriel est le co-concepteur chargé de la notion d'estime du produit.

3.2.3. La conception mécanique

Le métier d'ingénieur date des toutes premières constructions humaines à l'antiquité puis au moyen âge. Les premiers savants, inventeurs, architectes, ont tous été considérés comme les premiers ingénieurs que l'on ait connus. Parmi les grands ingénieurs mécaniciens de l'histoire, nous pourrons retenir entre autres Archimède et ses travaux en physique appliquée. Gutenberg et Léonard de Vinci ont eux aussi marqué leur temps par la mise au point de systèmes mécaniques fabriqués par la suite et dont on parle encore aujourd'hui.

Selon la Commission des Titres d'Ingénieur et le Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France, le concepteur mécanicien est défini comme l'acteur chargé de résoudre des problèmes d'ordre mécanique, liés à la conception, à la réalisation et à la mise en œuvre de produits ou de systèmes mécaniques [CNISF 2007].

Dans le cadre de nos travaux, nous définirons la conception mécanique comme la discipline qui touche aux composantes techniques de la conception et du développement des produits et systèmes, en termes de mécanique du point et du solide, de résistance des matériaux, de modélisation géométrique, de conception technologique intégrant les coûts à travers l'analyse de la valeur, et des procédés de fabrication.

3.3. Organisation d'une équipe projet multidisciplinaire

Alors que la constitution d'une équipe de conception multidisciplinaire devient nécessaire, la question d'organisation et de gestion de projet se pose. Comment permettre à chaque acteur d'intervenir dans les meilleures conditions dans le cadre du projet de conception de produits ?

3.3.1. Vers une conception simultanée et concourante

La multidisciplinarité des équipes de conception nous amène assez naturellement à une problématique de centralisation et de conception concourante. La conception concourante consiste en une intégration et une exécution des activités de chaque acteur du processus de conception, le plus possible en parallèle dans le but d'en réduire la durée totale [SOHL 1992]. En effet, chaque métier doit régulièrement mettre à disposition des autres acteurs les résultats issus de son approche du projet. En témoigne la figure 5 issue des travaux de Sagot sur la démarche pluridisciplinaire de conception [SAGO 2005]. Cette figure met en évidence la transversalité de l'ingénierie de produits, et la position centrale de l'objectif final : la satisfaction de l'utilisateur/opérateur.

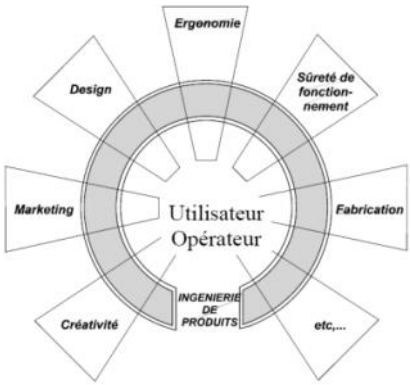


Figure 5 : La conception de produit, une démarche pluridisciplinaire, selon Sagot [SAGO 2005]

D'autre part, depuis plusieurs décennies, les enjeux industriels ont poussé les entreprises à passer d'une conception séquentielle à une conception simultanée, compatible avec ce type d'organisation concourante, et permettant à plusieurs acteurs d'avancer sur des tâches parallèles simultanément [BOSS 1997].

Dans son article sur les « produits concept » [CHRI 2003], Christofol s'appuie sur la littérature pour avancer que l'ingénierie concourante est préconisée en particulier pour diminuer les délais, les

coûts et augmenter la qualité [PERR 2001a], augmenter la simultanéité des travaux [TICH 1998], améliorer la cohérence du produit [BOUC 1999], et favoriser la Coopération, la Coordination et la Communication au sein de l'équipe de conception [SAAD 2000].

La Coopération est définie par Boutigny comme une organisation collective du travail dans laquelle la tâche à satisfaire est fragmentée en sous-tâches, chacune de ces sous-tâches est ensuite affectée à un acteur, soit selon une distribution parfaitement horizontale dans laquelle tâches et acteurs sont équivalents, soit selon une logique d'attribution en fonction des compétences particulières de chacun. » [BOUT 2004].

La Collaboration est quant à elle définie par Zaibet comme une situation de travail collectif dans laquelle tâche et but sont mis en communs. Tous les acteurs travaillent sur les mêmes points. [ZAIB 2006].

Selon Gronier [GRON 2006], la démarche de l'ingénierie concourante implique de nouvelles formes de travail collectif entre les acteurs de la conception. En accord avec Béguin [BEGU 1997], il évoque deux niveaux d'interdépendance : l'intégration, relative à la production de la conception, et la coordination, relative à l'activité de conception.

D'après Lonchampt [LONC 2003], l'objectif est de formaliser les connaissances propres à chaque métier associé au processus de conception, afin que les autres acteurs soient à même d'intégrer ces connaissances dans l'exécution de leur tâche, et donc de tenir compte de contraintes issues d'autres disciplines. Les difficultés de formalisation de certaines connaissances puis de leur décontextualisation [PRUD 1999] ont peu à peu poussé l'intégration des connaissances vers une intégration des acteurs de la conception [TICH 1995], touchant ainsi à la structure même d'une équipe de conception ainsi qu'à son fonctionnement.

3.3.2. Différentes organisations de projet

Afin de structurer les équipes projets multidisciplinaires, plusieurs organisations ont été mises en place. Nous pouvons en retenir quatre types, décrits par Clark [CLAR 1988] :

La première est structurée via un **élément dit « facilitateur »**, dont la mission est d'animer les différents métiers impliqués dans le projet. Il est généralement issu de la direction de l'entreprise. L'avantage de cette structure est que, quelque soit le projet, elle ne remet pas en cause l'organisation de l'entreprise.

La deuxième est structurée en équipe projet dont le pilotage se fait par un **coordinateur de projet**. Ce coordinateur est chargé de la planification des étapes du projet et dispose d'une autorité

opérationnelle, c'est-à-dire qu'il est chargé de la prise de décision relative au projet et d'assurer leur application. Il n'est pas pour autant responsable du personnel amené à travailler sur le projet. Chaque équipe projet dispose de responsables métier. Cette organisation est adaptée aux projets complexes avec de nombreux intervenants

La troisième organisation proposée par Clark est une **structure matricielle** où les équipes projets et métiers sont croisées. Le chef de projet dispose d'une autorité opérationnelle sur tout le personnel des équipes concernées. Cette autorité n'est pas pour autant fonctionnelle. Le chef d'équipe reste garant du bon fonctionnement de son équipe. Les avantages principaux de cette organisation résident dans le fait qu'elle préserve la flexibilité, la réactivité et l'efficacité des projets, tout en conservant l'expertise et la capitalisation de l'expérience métier. Cette organisation convient donc pour les entreprises disposant d'une bonne expérience des projets, comme dans les grandes industries (automobiles, aéronautiques, etc.).

Enfin, la quatrième organisation est nommée par Clark **« plateau projet »** ou **« task-force »**. L'idée est de détacher une équipe entière, et de la dédier au projet concernée. Cela permet de disposer d'une structure autonome et indépendante du reste de l'entreprise. Le chef de projet dispose ainsi d'une autorité opérationnelle et fonctionnelle. L'enjeu est de permettre de raccourcir les délais et les coûts du projet puisque la proximité des membres de l'équipe facilite généralement l'ingénierie concourante. Cette organisation est en principe choisie pour concentrer les efforts de l'entreprise sur un projet dont la réussite est importante (notamment dans le domaine du bâtiment, des travaux publics, ou les chantiers navals).

3.3.3. Pilotage projet et leadership

Une équipe multi-métier a pour atout indiscutable de pouvoir traiter de manière plus large un même problème. Néanmoins, la question de l'efficacité en termes de délais, peut se poser. Les spécificités des approches de chacun des experts rendent le processus de conception extrêmement complexe [MAIE 2003] [GRON 2004], car il devient impossible de décomposer le problème global en sous-problèmes totalement indépendants [VISS 2002].

Du coup, il est nécessaire de faire intervenir dans le projet de conception, un acteur dédié à la gestion du projet, capable de prendre du recul et de voir le projet dans sa globalité. Cet acteur, communément nommé chef de projet, s'occupe à la fois de la gestion des ressources (humaines, financières, matérielles), mais aussi du respect des objectifs en termes de qualité, coûts, délais, ainsi que de la satisfaction du client. Il existe deux niveaux de gestion de projet, la gestion externe, par un dirigeant dont le cœur de métier est la gestion et le management ; et la gestion interne, par l'un des

expert métier qui dispose d'une vision suffisamment large pour piloter le projet (architectes produits dans l'automobile par exemple).

Dans le cadre de projets multidisciplinaires où se confrontent plusieurs expertises, la prise de décision par un gestionnaire externe est souvent difficile car celui-ci n'est généralement pas spécialisé dans les disciplines techniques et ne connait pas le produit conçu. La notion de leadership prend donc une place importante dans la gestion du projet. De nombreux auteurs distinguent leadership de management, afin de dissocier les tâches de gestion technique (leadership), et les tâches de gestion logistique (management). Hinterhuber présente ces deux notions comme des éléments complémentaires (cf. figure 6) [HINT 2002]. Il met ainsi en évidence différentes tâches associées à l'activité de management, telles que les relations avec les fournisseurs, ou les décisions relatives à la fabrication en termes de politique, d'agencement et de procédés. Le leadership quant à lui, est associé à des tâches plus stratégiques, liées au développement concret du produit, comme la formalisation des objectifs, la définition des éléments sous-traités, ainsi que les questions de stratégie globale de positionnement du produit et du projet sur le marché.

Figure 6 : Management versus Leadership [HINT 2002]

Ainsi, il apparait important de disposer d'un manager chef de projet, et d'un leader qui fédère l'ensemble des acteurs autour du projet de conception. Il faut noter qu'alors que le rôle de manager occupe un rôle de gestion du début à la fin du projet, le rôle de leader évoluera au fur et à mesure de l'avancement du projet et du développement du produit. En phase amont, les métiers plus proches de l'utilisateur, qui traiteront de l'usage (l'ergonomie), de l'estime (le design industriel) disposeront d'un leadership naturel. Puis peu à peu, la technique prenant le dessus, le concepteur mécanicien reprendra le leadership afin d'assurer le développement d'un produit industriellement viable.

Le leadership est parfois lié à l'implication de la discipline concernée dans les différentes phases du processus. Ainsi, avec l'évolution de l'implication des métiers dans la conception du produit, le

leadership évolue naturellement. En témoigne la figure 7 dans laquelle nous pouvons observer les évolutions de l'implication de différentes disciplines (Business Modeling, Analysis & Design, Deployment, etc.) [PILE 2007]. Cette représentation nous permet de visualiser une évolution du leadership, depuis les disciplines liées au marketing, jusqu'à des disciplines plus proches des aspects techniques du produit.

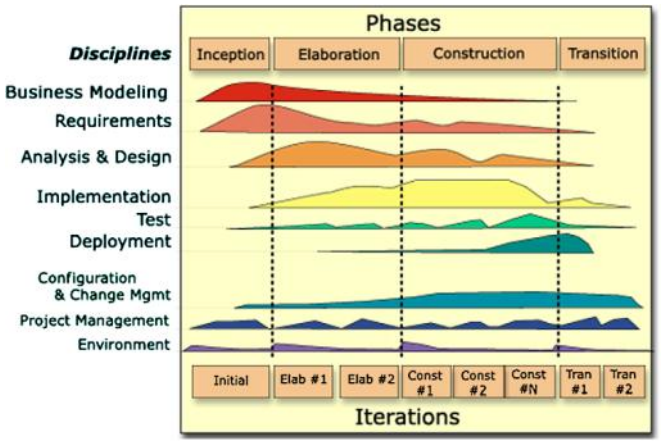


Figure 7 : Implication des disciplines durant le processus de conception [PILE 2007]

En ce qui concerne le manager, c'est lui qui est chargé du respect du planning, et qui gère en principe la centralisation des données ainsi que le respect des méthodologies employées.

4. Intégration de l'expertise métier

De l'ergonomie jusqu'au marketing et à l'écologie, de la gestion de projet au développement technologique, les métiers de la conception sont très différents. Pourtant, ils sont tous indispensables à la prise en compte de l'ensemble des besoins des utilisateurs, mais aussi du contexte socio-économique relatif au projet de conception [PAHL 1996]. Une collaboration performante des métiers est nécessaire afin de bénéficier des organisations de conception concourante et d'accélérer les processus de conception tout en garantissant l'aboutissement du projet.

Différents modèles de conception permettent d'intégrer des notions d'intégration de l'expertise métier *via* des « transversalités », c'est-à-dire des échanges entre métiers [WHEE 1992] [MOIS 1992] [MIDL 1998]. Dans son ouvrage « L'Auto qui n'existait pas », Midler présente deux types de transversalités : les transversalités entre métiers, et les transversalités d'interfaces techniques [MIDL 2004]. Il souligne ainsi les nécessités de collaboration culturelle (compréhension entre les acteurs de la conception) et technique (transmission des informations et traitement des données). Ces transversalités, tant sur le fond que sur la forme, rencontrent un même et unique problème : les

cultures, les méthodes et les outils varient beaucoup d'un métier à l'autre, et rendent difficile toute intégration des expertises de chaque acteur [GRON 2004].

Pour cela, des approches de conception peuvent être orientées vers ces différents métiers. Ces approches sont nommées Design For X (conception en vue de X), X étant le métier concerné.

4.1. Notion de design for X

4.1.1. Définition du DFX

La notion de design for X, « conception en vue de X » a fait son apparition dans les années 1990, avec pour objectif de définir des moyens d'orienter un processus de conception vers une discipline donnée :

- Design for Manufacturing [TRYB 1995] représente par exemple l'idée d'une conception de produit en mettant l'accent sur les contraintes de fabricabilité, en lien avec les process de fabrication disponibles ou ciblés par le projet.
- Design for Assembly [BOOT 1992] traite de la conception orientée architecture produit afin d'intégrer dans les meilleures conditions possibles les liaisons cinématiques entre organes et composants en considérant les contraintes d'assemblage.
- Design for Recycling [BEIT 1993] s'oriente vers une conception considérant le recyclage du produit en fin de vie.

Le DFX s'inscrit au cœur de l'ingénierie concourante [DAI 2002] car il permet une évaluation des concepts et permet d'extraire des recommandations selon chacune des approches considérées. Dans la pratique, le DFX représente une suite de techniques de développement de produit qui peut être efficacement appliquée dans le processus de conception et qui permet non seulement la rationalisation des produits, mais également des processus et des systèmes associés [HUAN 1997].

4.1.2. Design for Ergonomics

En accord avec la définition du DFX, le procédé d'intégration de l'ergonomie dans la conception, ou d'une conception pour l'ergonomie [PAHL 1996] peut se caractériser par la terminologie « Design for Ergonomics » [VALL 1992] [WEAV 2000] ou encore, Design for Usability [JORD 2000].

Cette intégration se base sur les similarités qui existent entre le processus de conception mécanique et la démarche ergonomique [SAGO 1996]. Selon cette démarche, un certain nombre de tâches spécifiques peuvent être attribuées à l'ergonome dans un contexte de conception. En effet, son expertise permet d'intervenir sur des tâches relatives à l'utilisateur et ses caractéristiques (psychologiques et physiologiques), mais aussi au produit conçu et son utilisabilité, ses modes

d'usage, et ce durant l'ensemble de ses situations de vie, de la fabrication à la fin de vie et le recyclage.

4.1.3. Design for Aesthetics / Design for Emotion

Concernant l'estime, plusieurs approches sont proposées : Design For Aesthetics [PAHL 1996] [CHEU 2007], Design For Emotion [NORM 2004], Design For Pleasure [JORD 2000]. Ces différentes approches corroborent les différentes définitions du design industriel évoqué précédemment (Chapitre II, §3.2.2).

L'objectif de ces travaux est la structuration du projet de conception afin de garantir la prise en compte des facteurs considérés comme importants, et notamment l'esthétique qui n'est généralement pas traitée par le concepteur mécanicien. D'après Quarante, la valeur esthétique est composée de caractéristiques syntactiques (forme, couleur, texture), pragmatiques et sémantiques (culture, habitude, plaisir) [QUAR 2001]. De ce fait, une intégration de chacune de ces caractéristiques doit pouvoir être réalisée. Nous considérons l'ensemble des DFX évoqués, afin de recouvrir à la fois les caractéristiques objectives (forme, couleur, etc.), et les caractéristiques subjectives (perception, émotion, etc.).

4.2. L'intégration de l'expertise métier dans le processus de conception

4.2.1. L'intégration de l'ergonomie

De nombreux auteurs ont proposé des démarches ergonomiques permettant une structuration d'un processus proche du processus de conception, l'enjeu étant de prendre en compte des problématiques relatives à l'Homme, et de concevoir des produits répondant aux véritables problématiques des utilisateurs. Ainsi, Sagot propose par exemple un modèle de conception organisant les tâches de l'ergonome autour du processus de conception concourante. En témoigne la figure 8 qui met en évidence les multiples niveaux d'intervention de l'ergonome pendant toutes les phases du processus [SAGO 2003].

L'ergonome intervient dès le début du processus de conception. Sa première tâche est d'étudier la faisabilité du produit, à travers l'étude de la cible et l'ensemble des critères qui la caractérise, ainsi que l'étude des besoins, et des situations d'utilisation des produits équivalents.

A partir de ces études de faisabilité, l'ergonome avance des préconisations ergonomiques, qui vont servir de base au cahier des charges, en apportant des réponses aux questions « à quoi sert le produit ? » et « comment l'utilisateur utilisera le produit ? », et en avançant des premières voies de solutions [LEBO 2001]. L'ergonome peut proposer ensuite un ensemble de situations futures d'utilisation souhaitable du produit [LIM 2006]. C'est ce que l'on appelle l'ergonomie de conception.

Elle est la moins coûteuse, mais la plus complexe à mettre en œuvre étant donné qu'on ne connait pas encore les usages futurs exacts.

Enfin, lors des phases de conception détaillée et d'optimisation du produit, l'ergonome pourra assurer un suivi afin d'assurer le respect des différentes préconisations [KADR 2007]. Il pourra aussi proposer des corrections si l'une des préconisations n'est pas respectée.

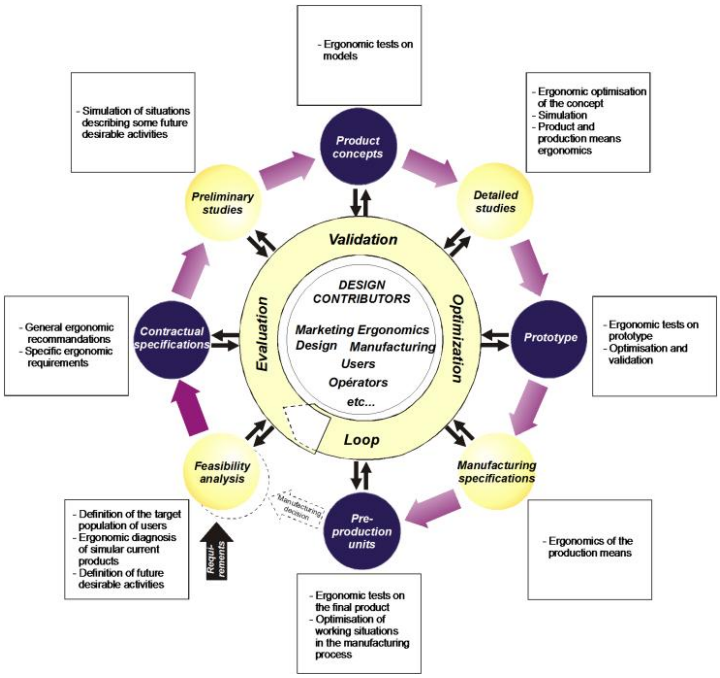


Figure 8 : Modèle simplifié de conception et de développement de produits avec précision des étapes propres à la discipline de l'Ergonomie [SAGO 2003]

On constate que dans le processus de conception d'un produit, l'ergonome intervient en particulier dans les phases amont, et participe ainsi à la définition initiale des besoins, puis des premières fonctions d'usage du produit. Au fur et à mesure du développement du produit, son rôle change et il se charge de garantir le respect des différentes préconisations établies en avant-projet. Le degré de liberté qui lui incombe est donc très grand au début du projet, et diminue lorsque les fonctions techniques du produit sont établies puis développées. Il est donc possible de traduire l'approche ergonomique de la conception, en s'appuyant sur les travaux de Duchamp [DUCH 1988] repris par Chitescu [CHIT 2003] (cf. Figure 9). Cette représentation permet aussi de mettre en évidence différents échanges pouvant apparaitre lors de la conception et du développement d'un produit. Ces échanges évoluent selon les supports de représentation et d'interaction entre l'Homme (H), le Produit (P), et l'Environnement (E). Ainsi, dans une première phase d'étude de faisabilité, les supports d'échange sont une triade Homme-Produit-Environnement Réels. Puis dans une deuxième phase d'étude préliminaire, cette triade est numérisée, via l'utilisation d'un Homme, d'un Produit et d'un Environnement virtuels. L'apport du numérique est souligné car il permet de réduire les coûts et

les temps de réalisation de prototype de validation, et permet une réactivité en temps réel du modèle 3D représentant l'objet conçu. Dans une troisième phase d'étude détaillée, le Produit et l'Environnement restent virtuels afin de permettre une évolution rapide de l'objet conçu, mais c'est un Homme Réel qui simule une activité future du produit. Enfin, dans une quatrième phase d'industrialisation, un prototype (Produit Réel) est mis à l'épreuve par un Homme Réel dans un Environnement Virtuel. Ainsi, les conditions d'utilisation du produit sont contrôlées et permettent une validation rapide de son industrialisation.

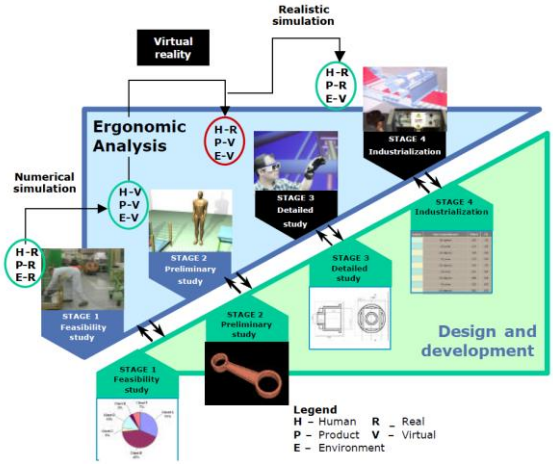


Figure 9 : Méthodologie de conception centrée sur l'homme traduisant l'articulation "Ergonomie – Conception", Selon Chitescu [CHIT 2003] en accord avec [DUCH 1988]

D'autres travaux visent à mettre en évidence l'intérêt d'intégrer l'ergonomie en se basant sur des données prescriptives quantifiées [DARS 2002]. Cette approche, basée sur les normes ergonomiques, a l'avantage d'être directement interprétable par le concepteur mécanicien qui peut l'intégrer dans le développement de produit dès la phase de définition du problème (cahier des charges). Ces données chiffrées peuvent d'ailleurs être considérées comme des paramètres par le concepteur mécanicien, permettant d'établir un certain nombre de règles de conception intégrant de manière automatisée les composantes normatives ergonomiques [AL KH 2011]. Malheureusement, cette approche normative quantifiée tend à éloigner l'expertise de l'ergonome. Aussi, Mahdjoub propose une méthodologie de Conception de l'Usage (CURV), permettant à la fois, l'intégration des composantes normatives, mais aussi de l'expertise métier des ergonomes, avec l'aide des technologies de réalité virtuelle [MAHD 2010]. En effet, l'apport subjectif que représente l'expertise de l'ergonome, représentant une grande part de la démarche ergonomique, et se doit d'être pris en compte.

4.2.2. L'intégration du design industriel

Le design industriel ne dispose malheureusement pas d'autant de propositions d'intégration que l'ergonomie. Pourtant, les problématiques de prise en compte de l'émotion, du plaisir, de

l'esthétique, ont toujours existé. Ici, nous étudierons aussi bien les tentatives d'intégration du design que du design industriel, car les problématiques et les solutions apportées sont similaires.

De nombreux scientifiques, chercheurs, ont tenté de comprendre comment pouvait se faire cette intégration, et plusieurs solutions existent : La théorisation, la quantification, la caractérisation, et la collaboration.

- La première constitue un ensemble d'essais de théorisation dite « locale » du design. L'idée, présentée par Findeli, est de tenter de définir un ensemble de vérités localement justes afin de vérifier leur exactitude dans des contextes différents dans le but de définir *a minima* une vérité universelle [FIND 2006]. On parle aussi de théorie de la perception [CLER 2000], ou de théorie des couleurs [PLUT 1980] [CHRI 1994], visant à aider les concepteurs à mieux comprendre les choix des designers industriels et de mieux les intégrer dans le processus de conception. Cette volonté de comprendre des notions relatives à une cohérence ou l'attractivité d'un produit n'est pas nouvelle : l'exemple le plus relayé est le nombre d'or[3] [QUAR 2001]. Cette approche théorique du design rencontre néanmoins des limites : le design touche à des valeurs perçues par l'être humain (esthétique, cohérence, etc.) qui ne répondent pas à des lois que nous savons contrôler à l'heure actuelle. C'est pourquoi la notion d'expert métier est conservée. Le designer industriel doit être capable de par son expérience et son savoir-faire, d'anticiper des usages, des effets de modes, et d'impliquer sa subjectivité et celle des utilisateurs futurs.
- La deuxième piste étudiée se rapproche de la théorisation. Elle concerne les travaux sur l'intégration du design industriel par la quantification du subjectif. En effet, la difficulté connue par toutes les équipes de conception multidisciplinaire réside dans le fait que chaque concepteur ne traite pas des mêmes données. Là où, par exemple, le concepteur mécanicien a besoin de données chiffrées directement implantables dans un modèle CAO par exemple, le designer industriel traite des données subjectives telles que l'attractivité du produit, ou la cohérence d'une gamme ou d'un produit avec son environnement et son utilisation. C'est donc naturellement que des chercheurs ont tenté de créer des liens entre les données subjectives d'un côté, et quantifiées de l'autre. Parmi ces essais, le cahier des charges augmenté, proposé par Bassereau, Bouchard, Le Coq ou Lattuf. L'idée est de permettre à des données subjectives d'être introduites dans un cahier des charges

[3] Le nombre d'or, égal à 1,618 est une valeur utilisée par les plus grands artistes et designers industriels, depuis l'antiquité. Encore aujourd'hui, ce nombre est considéré comme le rapport entrainant un équilibre esthétique parfait (Solution de l'équation $x[x-1]=1$).

habituellement utilisé par le concepteur mécanicien, telle qu'une analyse sensorielle, ou une étude sémiologique. [BASS 1996] [BOUC 1997] [DUCH 1991] [LE CO 1993] [LATT 2006] [MANT 2005]. Une autre tentative qui a fait ses preuves est l'ingénierie KANSEI [SCHU 2002] [SCHU 2006] [NAGA 1997]. Le principe est de déterminer des caractéristiques d'attractivité (nommées KANSEI) du produit conçu (courbure, surface, couleur, arrêtes), et de les mettre en lien avec les sens de l'utilisateur afin de déterminer si la caractéristique est attrayante ou non. En résulte une base de données KANSEI qui évolue au fil des projets de conception de produits. Lorsqu'une relation existe déjà dans la base de données, alors le KANSEI implique automatiquement une solution, sinon, de nouvelles solutions sont apportées, et viennent implémenter la base de données. Le premier produit qui a fait l'objet de la mise en évidence de l'ingénierie KANSEI est la Mazda Miata MX5, représentée sur la figure 10 et reconnue comme l'une des références en termes de véhicule cabriolet.

Figure 10 : Mazda Miata MX5, conçue selon l'ingénierie KANSEI

- Une troisième piste étudiée par d'autres auteurs traite de la **caractérisation** et du transfert de données (quantifiées ou non) [PERR 2001b] [MINE 2002]. Pour cela, la notion de valeur d'estime, évoquée dans notre introduction de thèse (§1, page 11) prend un sens nouveau. Le terme valeur peut ici être interprété de deux manières différentes : la valeur au sens mathématique du terme, objective, relative au produit, à ses dimensions, à ses caractéristiques ; et la valeur au sens sociologique du terme, subjective et relative à l'Homme, sa perception du produit, ainsi qu'au contexte de l'utilisation [LORI 1997] [CHAN 2005] [BENB 2006] [PERR 2001a] [RASH 2004]. Cette vision relativiste de la valeur, qui la place à la rencontre des deux entités produit et client [LORI 1997], est donc associée à la notion de jugement, de la part du sujet, incluant des aspects objectifs (coût, durée de vie, etc.), mais aussi des aspects bien plus subjectifs (estime, rareté, désir, etc.). C'est donc cette valeur qui motive et va créer les conditions favorables au choix d'un produit.

Associé à l'estime, la valeur concernée par cette troisième piste touche à l'aspect subjectif du produit et à la perception qu'en a l'utilisateur. L'idée est donc de considérer qu'une valeur d'estime pour le designer industriel, peut être transformée en une valeur technique pour le concepteur mécanicien. De nombreux auteurs cherchent, dans cette optique, à comprendre comment peuvent se faire ces transferts de valeurs [MINE 2002] [SHAD 2009]. L'avantage de cette caractérisation des

valeurs réside dans le fait qu'elle n'oblige pas les designers industriels à modifier leurs habitudes de travail, et n'ajoute pas d'outil supplémentaire. La caractérisation leur permet de conserver une part de subjectivité. En effet, ces caractérisations peuvent se formaliser avec les outils courants du designer industriel (mots clés, planches, croquis, DAO, maquette, etc.).

- Enfin, la quatrième piste étudiée par de nombreux auteurs traite de l'intégration du design industriel par la **collaboration** avec le concepteur mécanicien [BOUC 1997] [KATT 2006]. Malheureusement, contrairement à l'ergonomie, il n'existe que très peu de méthodologie de collaboration Design Industriel / Conception Mécanique.

C'est sur ce quatrième axe que nous souhaitons nous orienter. En effet, nous considérons que c'est dans un contexte de collaboration que les concepteurs, et en particulier les designers industriels, sont les plus aptes à exploiter toute leur expertise métier dans les meilleures conditions. De plus, cette collaboration permet aux concepteurs mécaniciens d'intégrer dans de meilleures conditions les notions relatives à l'estime du produit, avec l'aide du designer industriel.

Pour cela, nous nous appuierons sur les méthodes présentées de collaboration entre l'ergonome et le concepteur mécanicien, ainsi que des méthodes d'aide à la prise de décision [ADLA 2007] [SCAR 2004]. En effet, ces dernières mettent en évidence un certain nombre de stratégies de prise de décision, ainsi que des outils dédiés à cette tâche, qui peuvent être intéressants pour la collaboration entre différents métiers.

4.3. Synthèse et constats

Dans un premier temps, nous avons pu voir que la conception était une activité multidisciplinaire car elle nécessitait de répondre aux besoins multiples de l'utilisateur. Cette multidisciplinarité entraine des organisations spécifiques de l'équipe de conception, ainsi que du processus global. Enfin, nous avons pu voir qu'une bonne organisation ne suffisait pas, mais qu'il était nécessaire de prévoir une intégration de l'expertise métier (et en particulier celles de l'ergonome et du designer industriel), étape primordiale pour la prise en compte des caractéristiques, des attentes et des besoins des utilisateurs.

Par la suite, nous avons observé que le designer industriel, expert métier spécialisé dans l'estime du produit, et l'ergonome, expert métier spécialisé dans l'usage du produit, disposaient d'un certain nombre d'outils et méthodes parfois similaires aux outils utilisés par le concepteur mécanicien, mais ne permettant que très rarement une collaboration efficace.

Sur la base de la littérature étudiée, il apparaît un véritable problème d'intégration dû entre autre à la diversité des métiers et de leur culture. En effet, afin de respecter l'expertise de l'ergonome et du designer industriel, des solutions pour s'adapter à leurs méthodes et outils ainsi qu'à leur culture de la conception doivent être trouvées. Et malgré l'existence d'outils et de méthodes plus ou moins efficaces d'intégration de ces expertises, il n'existe, à notre connaissance, aucune méthodologie de conception de produits mécaniques prenant en compte ces métiers dans le processus de conception mécanique.

Nos travaux s'axent sur la recherche d'une méthodologie de conception de produits mécaniques permettant une meilleure intégration de l'ergonomie et du design industriel.

5. Problématique et première hypothèse de recherche

Dans un processus de conception qui se doit d'allier des composantes industrielles en termes de qualité-coût-délais, mais aussi des composantes humaines en termes d'usage et d'estime du produit, favoriser l'intégration de l'ergonomie et du design industriel est indispensable. Pourtant, les collaborations sont difficiles et les méthodologies n'intègrent pas complètement la multidisciplinarité de la conception. Sur la base de ce constat et de l'état de l'art, notre problématique générale est d'étudier l'intégration de l'expertise métier de l'ergonome et du designer industriel dans le processus de conception.

Selon nous, une méthodologie de conception doit prendre en compte la multidisciplinarité des équipes projet, et doit permettre à chaque acteur de disposer de ses propres repères. Elle doit aussi prêter une attention toute particulière aux échanges entre les différents métiers car c'est durant ces échanges qu'apparaissent les principaux problèmes d'intégration de l'expertise de chaque acteur.

Pour cela, nous avançons notre première hypothèse de recherche à laquelle nous tenterons de répondre :

> Première hypothèse de recherche : **La collaboration et la coopération entre les acteurs de la conception peut être favorisée par le biais d'une méthodologie globale de conception qui intègre la spécificité de chaque métier concerné (nous considérons les métiers d'ergonomie et de design industriel, articulés autour de la conception mécanique), ainsi que les interactions entre ces métiers existant tout au long du processus de conception.**

En effet, l'intégration de l'expertise de l'ergonome et du designer industriel passe par une meilleure collaboration avec le concepteur mécanicien. Pour cela, la mise en œuvre d'une méthodologie prenant en compte cette multidisciplinarité semble s'avérer indispensable.

Le chapitre suivant présente une proposition de méthodologie globale de conception et se propose de la mettre à l'épreuve dans le cadre de plusieurs projets de conception de produits mécaniques nouveaux.

CHAPITRE 3 :
APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'INTEGRATION DE L'ERGONOMIE ET DU DESIGN INDUSTRIEL DANS LA CONCEPTION

1. Introduction

Ce troisième chapitre se propose de traiter notre première hypothèse de recherche selon une approche méthodologique. Pour rappel, l'ergonome et le designer industriel sont considérés comme des co-concepteurs experts de leur discipline, et l'intégration de ces métiers est indispensable à la conception d'un produit répondant à l'ensemble des besoins de l'utilisateur. Malheureusement, comme évoqué dans le chapitre précédant (§4.3, page 45), les méthodologies, méthodes et outils de l'ergonome, du designer industriel ou du concepteur mécanicien, ne sont pas toujours adaptés à un travail collaboratif permettant cette intégration.

Pour cela, nous avons proposé une première hypothèse de recherche selon laquelle une méthodologie adaptée permettrait cette collaboration.

> Rappel première hypothèse de recherche : **La collaboration et la coopération entre les acteurs de la conception peuvent être favorisées par le biais d'une méthodologie globale de conception qui intègre la spécificité de chaque métier concerné (nous considérons les métiers d'ergonomie et de design industriel, articulés autour de la conception mécanique), ainsi que les interactions entre ces métiers existant tout au long du processus de conception.**

La question que nous posons est de savoir dans quelles mesures une nouvelle méthodologie, intégrant les spécificités de chaque discipline ainsi que toutes les interactions entre les métiers, pourrait permettre une meilleure intégration de l'ergonomie et du design industriel dans la conception de produits mécaniques.

Dans une **deuxième partie**, nous proposons une nouvelle méthodologie globale de conception « Ergonomie – Conception Mécanique – Design Industriel », développée dans le cadre de nos travaux. Cette méthodologie est basée sur le processus de conception mécanique, auquel sont accolés des approches spécifiques aux métiers d'ergonome et de designer industriel. Nous soulignons qu'en accord avec la littérature, ce modèle s'inspire de démarches propres à chaque discipline, et se structure selon plusieurs grandes phases. De cette manière, la méthodologie permet à chaque acteur de conserver ses repères dans le processus de conception, tout en accompagnant les équipes projets dans un processus de conception global de produits mécaniques.

Dans une **troisième partie**, nous mettons cette nouvelle méthodologie à l'épreuve de plusieurs projets de conception. Cette mise à l'épreuve a pu se faire dans le cadre du Projet interrégional « Interreg IIIA » de 2006 à 2008, projet portant sur la thématique : « Conception de mobilier urbain :

l'ergonomie et le design dans la ville pour un espace de vie pour tous ». Différents sujets sont traités portant sur la conception de mobilier urbain (bancs publics, des chaises longues, etc.). Le projet de conception du banc de la gamme Sirocco permet d'illustrer cette mise à l'épreuve.

Dans une **quatrième partie**, et suite à l'exemple du banc sirocco, nous proposons une étude plus spécifique des échanges entre les différents acteurs tout au long du processus de conception. Nous soulignons en particulier que la prise en compte de ces échanges dans le processus de conception, permet de mieux les anticiper.

Enfin, dans une **cinquième partie**, nous concluons ce chapitre en discutant certains de nos résultats. Nous définissons un second cadre d'étude et détaillons notre deuxième hypothèse de recherche.

2. Proposition d'un nouveau modèle de conception

2.1. Coordination de différentes approches de la conception

Le concept initial du modèle proposé se base sur les approches ergonomiques et design industriel de la conception. De nombreux auteurs soulignent que les ergonomes interviennent tôt dans le processus de conception, dans le cadre des études préliminaires et des premières recherches de solution (en témoigne la représentation de Duchamp reprise par Chitescu, présentée sur la figure 9, §4.2.1, page 42 [DUCH 1988] [CHIT 2003]).

De la même manière, nous pensons que ce raisonnement peut être appliqué au design industriel. En effet, tout comme l'ergonome, le designer industriel est l'un des premiers acteurs à intervenir au cours du processus de conception. Il fait naître des formes, un fonctionnement, une utilisation, tenant compte de l'ensemble des contraintes identifiées lors de l'étude du besoin. Son rôle est de formaliser un ou plusieurs concepts puis de les transmettre au concepteur pour qu'il puisse les développer. Ensuite, son rôle est de veiller à ce que les caractéristiques idéales du concept soient conservées au mieux, malgré les modifications et les itérations dues aux nécessités techniques de réalisation du produit. Cette approche design industriel peut ainsi être apparentée à l'approche ergonomique. Nous proposons donc une formalisation de l'articulation Conception Mécanique – Design Industriel, inspiré du modèle de Duchamp et représentée sur la figure 11.

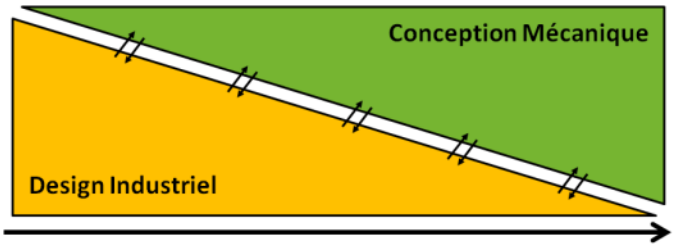


Figure 11. Représentation simplifiée de l'articulation Design industriel - Conception Mécanique [GUER 2009]

Sur la base du rapprochement entre le Design Industriel et la Conception Mécanique, et en accord avec notre positionnement scientifique, qui définit la discipline de conception mécanique comme l'élément central du processus de conception « Ergonomie – Conception Mécanique – Design Industriel », nous proposons de présenter un modèle unique intégrant ces deux approches. Ce modèle, formalisé sur la figure 12, combine à la fois les approches ergonomiques et design industriel de la conception, ainsi que les échanges opérés tout au long du processus. L'idée est de synchroniser plusieurs méthodologies propres à chaque métier en les structurant selon un processus unique composé de quatre phases issues des travaux de Suh [SUH 1990] (Figure 3, chapitre II. §2.2.2., Page 26). Nous notons que la deuxième phase décrites par Suh, à savoir « Définir et formaliser le problème à résoudre pour satisfaire les besoins », n'est plus considérée comme une phase, mais comme un élément de transition : le cahier des charges, dont la mise en place marque la fin de la première phase [QUAR 2001].

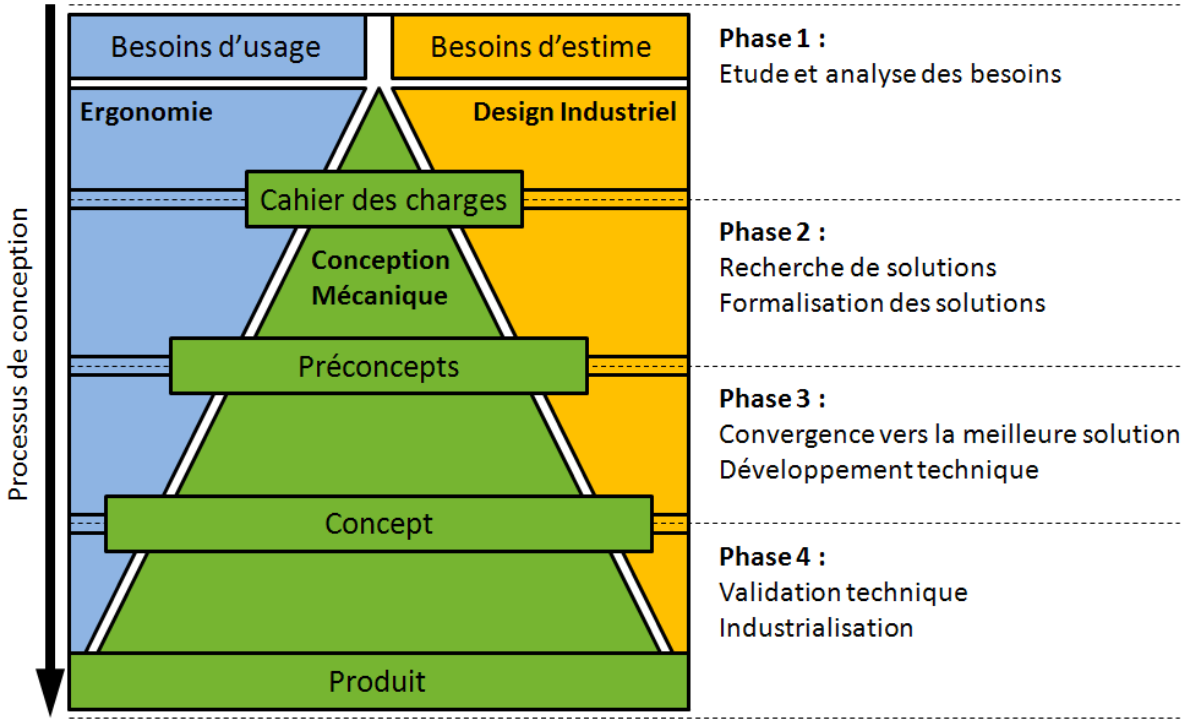


Figure 12 : Représentation simplifiée de l'approche globale du processus de conception [GUER 2009]

Le modèle présenté est détaillé selon les différentes approches et phase par phase dans la partie suivante.

2.2. Méthodologie globale de conception pluridisciplinaire

Dans le cadre du modèle présenté en figure 12, chaque acteur du processus de conception s'appuie sur des méthodologies et des outils qui sont propres à son corps de métier. Malgré les écarts importants entre les cultures métier, ces processus sont similaires et sont composés de différentes phases : étude et analyse des besoins, recherche et formalisation de solutions, convergence vers la meilleure solution et développement technique, validation du produit final.

Pour détailler encore plus le rapprochement proposé par la figure 12 entre le Design Industriel, la Conception Mécanique et l'Ergonomie, nous proposons la figure 13. Cette formalisation est constituée de trois processus de conception, issus de chacun des métiers concernés. Les processus retenus pour ce travail sont la démarche ergonomique décrite par Sagot [SAGO 2003], le processus design industriel défini par Quarante [QUAR 2001], ainsi que le processus de conception mécanique décrit par Ullman [ULLM 2001]. Ces trois modèles de conception se structurent de manière similaire que la démarche de conception de Suh présentée dans le paragraphe §2.2.2 du chapitre II, mais demeurent plus détaillés. La phase d'analyse fonctionnelle du besoin s'appuie sur l'Analyse de la Valeur [AFNO 2007]. Dans les trois parties suivantes, nous décrivons chacune des approches présentées sur la figure 13.

2.2.1. Le rôle de l'ergonome dans le nouveau modèle (cf. figure 13, p. 55)

Selon l'approche ergonomique proposée, l'ergonome se voit attribuer un certain nombre de tâches qui s'organisent autour du processus de conception. Il intervient dès la phase 1, afin de définir les besoins d'usage. Ces besoins d'usage sont mis en évidence dans le cadre d'une étude de l'activité actuelle étudiée, ainsi que des difficultés rencontrées par les utilisateurs. Cette définition des besoins passe en particulier par une étude de la cible ainsi que des activités futures souhaitées. L'ergonome déploie ainsi un ensemble de méthodes et d'outils d'analyse de l'activité et de la cible afin de mettre en évidence les besoins d'usage et de définir un ensemble de spécifications d'usage. Ces spécifications servent de base au cahier des charges ergonomique, qui représente la formalisation du problème de conception faite par l'ergonome. Il est constitué de fonctions d'usage généralement considérées comme les fonctions principales du produit au sens de l'Analyse Fonctionnelle. Lors de la phase 2, de recherche de solutions, l'ergonome participe à l'élaboration de scénarios d'usage ainsi qu'aux recherches communes de solutions (brainstorming, etc.). Il peut être amené à formaliser un certain nombre de préconcepts, sous forme de maquettes ou de modélisations numériques, afin de les mettre à l'épreuve aux travers de différents tests ergonomiques. Enfin, dans les deux dernières phases de développement et de validations, l'ergonome assure un suivi du développement technique du produit afin de garantir le respect des spécifications d'usage établies. Ces évaluations peuvent se situer à différents niveaux du processus de développement (solution détaillée, prototype

ou produit industrialisé), et sur différents supports (du modèle 3D numérique au prototype fonctionnel). Ainsi, l'ergonome peut assurer un retour direct auprès du concepteur mécanicien dès lors qu'un problème apparait.

2.2.2. Le rôle du designer industriel dans le nouveau modèle (cf. figure 13, p. 55)

Le designer industriel intervient lui aussi dès la phase 1 d'étude et d'analyse des besoins. Au cours de cette première phase, il est chargé de définir les besoins d'estime. Ces besoins d'estime sont mis en évidence par une étude de l'environnement du produit futur, afin d'assurer sa cohérence dans son ensemble. Dans cette définition des besoins, le designer industriel étudie aussi la population ciblée afin d'en déduire différentes approches conceptuelles (produits pour l'enfance, produits grand public, produits pour personnes à mobilité réduite, etc.). Dans le cadre d'une étude préliminaire, le designer industriel est amené à entamer des études prospectives et schématise plusieurs aspects (parfois des recherches sur des textures, sur des formes, etc.) le but étant de détecter des tendances et d'anticiper l'attractivité du produit. L'ensemble de ces éléments sont centralisés dans le cadre de différentes spécifications d'estime, souvent représentées par le designer industriel sous la forme de planches de tendance ou de « cahier des charges Design ». La phase 2, de recherches de solutions, donne lieu à une divergence créative où le designer industriel est amené à formaliser différents avant-projets design. Ces formalisations peuvent se présenter sous la forme de schémas, de dessins, mais aussi de modèles numériques ou de maquette à échelle réduite [PIPE 2007]. Enfin, lors des phases de développement et de validation, tout comme l'ergonome, le designer industriel accompagne le concepteur mécanicien afin d'assurer un contrôle du respect des spécifications d'estime. Afin d'assurer la validation du produit développé, le designer industriel pilote la mise en œuvre d'une « maquette de référence », ou d'un « master », dont l'enjeu est de tester les composantes d'estime, et notamment les formes, l'architecture produit, etc.

2.2.3. Le rôle du concepteur mécanicien dans le nouveau modèle (cf. figure 13, p. 55)

En accord avec notre positionnement (chapitre I. §3, page 14), le concepteur mécanicien est le chef de projet et s'occupe de l'aspect management. Il est de fait garant de la gestion du projet et de l'intégration de l'ergonomie et du design industriel. De ce fait, il étudie dans un premier temps les besoins relatifs au projet de conception, en termes de ressources (humaines, matérielles et financières) ainsi que de délais. Puis il est chargé d'établir une planification du projet sur la base des premières analyses des besoins d'usage et d'estime faites par l'ergonome et le designer industriel. Dans un deuxième temps, le concepteur mécanicien pilote une analyse fonctionnelle externe. L'objectif est de formaliser les besoins et les spécifications mis en évidence par l'ergonome et le designer industriel, dans le cadre d'un cahier des charges fonctionnels. Dans la phase 2, de recherche de solutions, le concepteur mécanicien réalise une recherche de solutions techniques visant à mettre

rapidement à disposition de l'ergonome et du designer industriel un soutien technique pour leurs propres recherches créatives. Les premiers retours donnent lieux à un pré-dimensionnement et à une étude des process nécessaires. L'idée est d'anticiper la formalisation des préconcepts, et de réaliser différentes formalisations techniques et fonctionnelles. C'est lui qui est chargé de la centralisation et de l'uniformisation des différentes formalisations des préconcepts. Lors de la phase 3, de développement de la solution, le concepteur mécanicien assure une modélisation ainsi qu'une optimisation du concept retenu, tout en garantissant un respect des spécifications de l'ergonome et du designer industriel. Il formalise la solution détaillée afin de la mettre à l'épreuve lors de la dernière phase. Enfin, il est chargé de la définition technique du produit et du suivi de l'industrialisation.

2.2.4. Synthèse

Le modèle présenté sur la figure 13 détaille donc les trois processus synchronisés selon les quatre phases évoquées. En accord avec la littérature, différentes formalisations intermédiaires permettent d'assurer la transition d'une phase à l'autre. C'est par exemple le cas du Cahier des Charges pour valider la phase 1 d'étude des besoins. Ces formalisations se veulent communes à tous les concepteurs, pourtant, nous maintenons les modes de formalisation de chacun des métiers. En effet, nous considérons pour le moment que c'est le concepteur mécanicien qui s'adapte aux formalisations de l'ergonome et du designer industriel.

Néanmoins, un effort de transformation des formalisations est demandé à chaque acteur afin de les rendre compréhensibles. Ainsi, l'objectif est pour le concepteur mécanicien de proposer des combinaisons de l'ensemble des formalisations de chacun des métiers. Ainsi, nous aurons un « Cahier des charges global », intégrant chacun des trois volets du projet. Les préconcepts et solutions présélectionnées (présentés sous forme de texte, de dessins, de maquette ou de modélisation numérique selon les cultures métiers), sont centralisés par le concepteur mécanicien qui est chargé d'uniformiser leur présentation sous la forme d'une représentation commune. Chaque acteur défend ses propositions, mais les confrontations peuvent ainsi se faire sur la base d'une même représentation. Il en est de même pour la présentation du concept détaillé, et la validation du prototype puis du produit industrialisé.

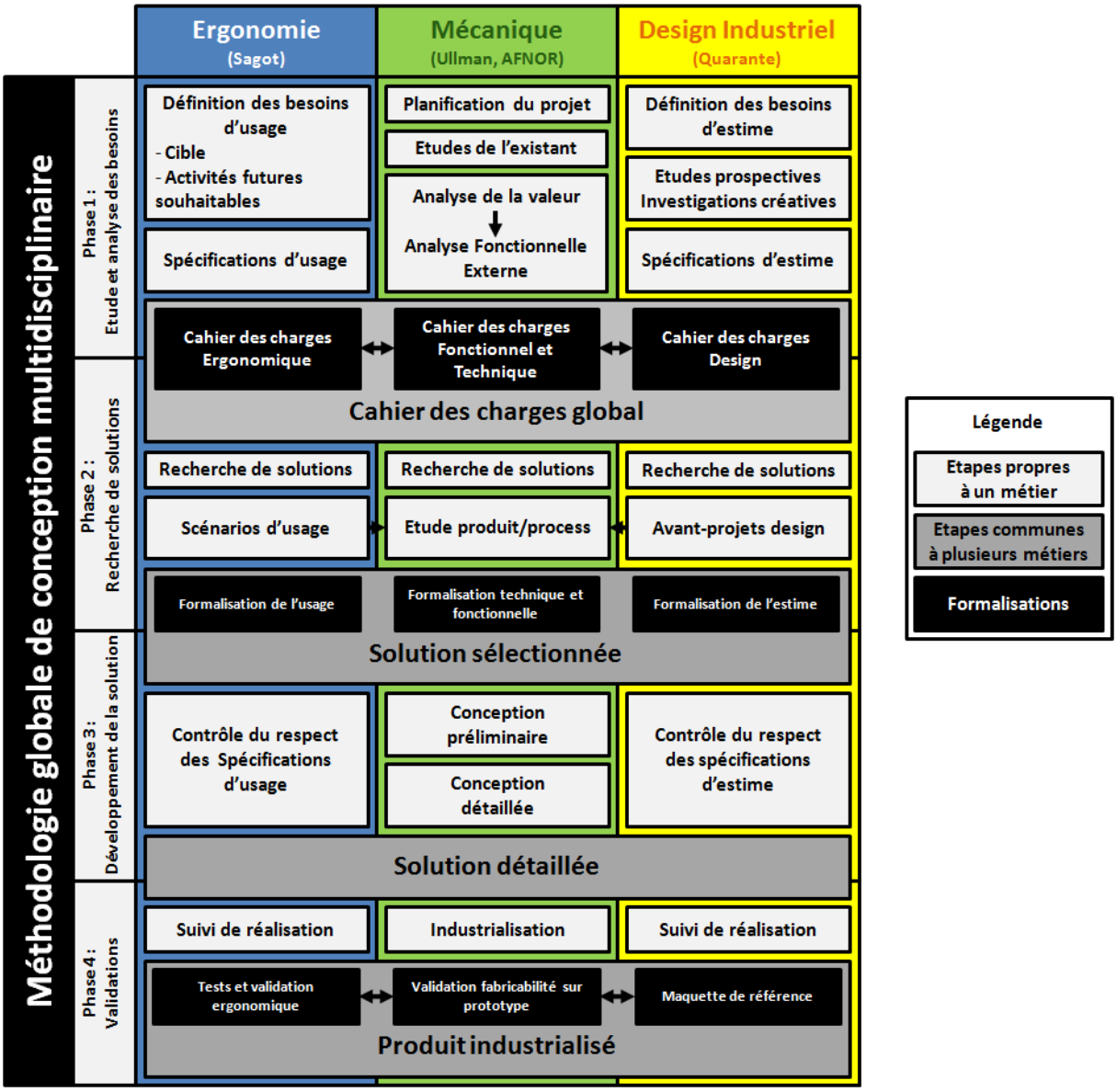


Figure 13. Méthodologie globale de conception multidisciplinaire [GUER 2009]

La méthodologie globale de conception maintenant formalisée, il nous est possible de la mettre en œuvre dans le cadre de projets industriels. Dans un premier temps, nous chercherons à valider les différentes étapes du processus, puis dans un deuxième temps, nous étudierons les interactions entre les différents concepteurs, tout au long du processus.

3. Expérience 1A : Mise à l'épreuve du modèle proposé – Projet INTERREG

3.1. Introduction

Notre première expérimentation consiste à mettre à l'épreuve la méthodologie proposée (cf. §2.2., page 52). L'objectif est de valider le cheminement des étapes en suivant scrupuleusement le

processus défini, et de détecter les phases sensibles qui nécessitent des ajustement voir des approfondissements. Le modèle présenté a été mis à l'épreuve dans le cadre d'un projet interrégional Franco-Suisse. Ce projet INTERREG IIIA, a pour mission de renforcer les relations entre le pays de l'aire urbaine (SMAU) Belfort, Montbéliard, Héricourt, Delle, et l'ARC jurassien Suisse. Il concerne un volet pédagogique et un volet recherche et valorisation, et porte sur le thème « ergonomie et design dans la ville, pour un espace de vie pour tous » [SAGO 2008]. Le projet a porté sur la conception de plusieurs modèles de mobilier urbain dans le but de redynamiser le tissu industriel de l'aire urbaine. Sept projets de conception ont été menés : 3 bancs, 2 chaises longues publiques et 1 abri TER et 1 abri vélo.

L'hypothèse de l'étude que nous avons souhaité traiter est la suivante :

> Hypothèse 1a de l'étude : Une méthodologie globale de conception « Ergonomie – Conception Mécanique – Design Industriel » permet de faciliter l'intégration de l'ergonomie et du design industriel par la prise en compte des spécificités de chaque métier dans un processus unique.

3.2. Protocole

Afin de réaliser la mise à l'épreuve de notre modèle, une équipe multidisciplinaire de conception a été constituée. Elle se compose de :

- 3 designers industriels,
- 2 ergonomes,
- 5 concepteurs mécaniciens,
- 1 ingénieur et 1 technicien informatique en soutien pour la gestion informatique des données techniques.

Les projets supportant cette expérimentation ont été conduits conformément à la méthodologie présentée (cf. §2.2., page 52). En accord avec notre positionnement scientifique, les designers industriels ont été affectés aux tâches relatives à l'estime du produit, les ergonomes à l'usage et les ingénieurs mécaniciens ont traité les éléments techniques. La gestion du projet a été confiée à l'un des concepteurs mécaniciens (en fonction du projet traité).

Des observations ont été réalisées durant les revues de projet, ainsi que dans le cadre d'entretiens réalisés avec chacun des acteurs. L'ensemble des formalisations a pu être étudié durant et à la fin du projet.

Chaque projet avait pour objectif de transformer une idée issue de partenaires industriels ou de collectivités locales, en une solution directement industrialisable. Les phases d'industrialisation ont

été exclues de l'étude : les projets prennent fin lors de la validation de la solution technique proposée, par la réalisation d'un prototype fonctionnel échelle 1.

3.3. Réalisation : mise à l'épreuve du modèle proposé

En accord avec la littérature évoquée précédemment (§II.2.2.2.), notre processus s'est organisé suivant quatre grandes phases : l'étude et l'analyse des besoins, la recherche de solutions, le développement de la solution choisie, et la validation technique du résultat obtenu. La mise à l'épreuve présentée est illustrée par le projet de conception d'un banc public haut de gamme (gamme nommée Sirocco), faisant suite à une demande de la commune de Taillecourt (Doubs – 25). Ce projet est représentatif des problématiques rencontrées durant les 6 autres projets de conception. L'équipe de conception est constituée, pour ce projet spécifique, d'un ergonome, d'un designer industriel et d'un concepteur mécanicien chef de projet.

Afin de présenter cette mise à l'épreuve, nous suivons le processus de conception selon les quatre phases spécifiées.

3.3.1. Phase 1 : Etude et analyse des besoins

Dans un premier temps, des études précises des besoins d'usage et d'estime ont été réalisées respectivement par l'ergonome et le designer industriel. Le besoin exprimé étant formulé par le service communal d'aménagement du territoire, les deux acteurs ont dû redéfinir le besoin en se concentrant sur deux axes : les produits et usages existants, et les besoins et attentes des futurs utilisateurs.

En ce qui concerne l'ergonome, des études sur les usages du mobilier urbain lui ont permis de définir des besoins plus précis. Des questionnaires ont été soumis à différents utilisateurs de bancs existant déjà en place dans la zone ciblée. De plus, sur la base de normes ergonomiques, et suite à un ensemble de mesures et d'évaluation sur les produits existants (cf. Figure 14), un certain nombre de données relatives à la posture des utilisateurs, ou à l'accès au mobilier, ont pu être collectées dans le but de répondre à un confort optimal (exemple : inclinaison optimale de l'assise : 14° **α** 24°, profondeur d'assise : **L** 430mm, etc.). Une étude de la littérature a permis de s'inspirer de profils idéaux, tel que celui proposé par Grandjean [GRAN 1988] et présenté sur la figure 15. L'ensemble de ces éléments a pu être formalisé par l'ergonome sous la forme de spécifications d'usage, dans le but de mettre en œuvre un cahier des charges dit « Ergonomique ».

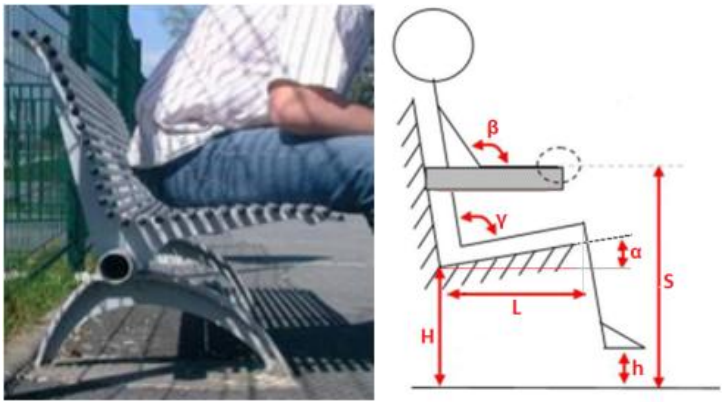


Figure 14 : Evaluation ergonomique des produits existants

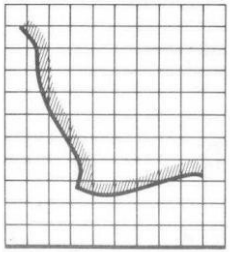


Figure 15 : Profil d'assise préconisé par Grandjean [GRAN 1988]

De son côté, le designer industriel a défini, en accord avec la consigne initiale du service communal d'aménagement du territoire, un ensemble de mots clés conceptuels (robustesse, naturel, exotique, etc.). Ces mots clés lui permettent de se réapproprier le besoin exprimé par le client. Des observations sur le terrain et des entretiens avec des utilisateurs, ont permis de compléter cette étude des besoins et des attentes en termes d'estime (désir de légèreté, adéquation entre le produit et son environnement, etc.). Une phase de recherche prospective a permis de définir plusieurs axes thématiques, formalisés en planches de tendance et d'univers, similaires à la planche présentée sur la figure 16. Ces formalisations, traduisant les attentes des futurs utilisateurs ainsi que de la commune, ont permis au designer industriel de définir un contexte de création de produit.

Figure 16 : Exemple de planche de tendance « High Tech »

Ces différentes formalisations ont donné lieu à un cahier des charges dit « global », constitué des résultats de l'analyse fonctionnelle externe, mais aussi de formalisation des spécifications d'usage (dans le cadre d'un cahier des charges « ergonomique ») et des spécifications d'estime (au travers d'un cahier des charges « design »). Ce cahier des charges global a servi de point de départ pour la phase de recherche de solutions. Dans la mise en œuvre de ces formalisations, le concepteur mécanicien chef de projet, opère une première interprétation technique des besoins et les traduit dans le cadre du Cahier des Charges dit « Fonctionnel et Technique », pour lequel il centralise l'ensemble des informations collectées. Ce cahier des charges se veut précis et permet de garantir une rigueur méthodologique certaine.

3.3.2. Phase 2 : Recherche de solutions

L'étape de créativité qui a suivi s'est traduite par une forte divergence puisque chaque acteur a cherché des idées les plus éloignées pour élargir le champ des solutions possibles. Ces études ont abouti à différents préconcepts répondant aux fonctions d'usage pour l'ergonome, à travers un nouveau profil d'assise et de dossier, des postures représentatives (cf. figure 17) ainsi que des scénarios d'usage.

Figure 17 : Proposition numérique d'un profil d'assise par l'ergonome

En ce qui concerne le designer industriel, ces études ont permis de répondre aux fonctions d'estime définies dans le cahier des charges initial. Des premiers croquis ont pu être réalisés, tels que le montre la Figure 18.

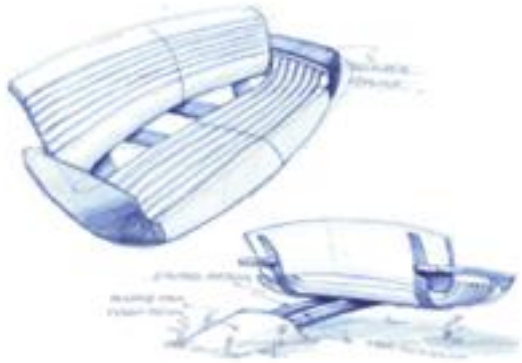


Figure 18 : Croquis de principe du designer industriel

De son côté, le concepteur mécanicien a réalisé une étude des différents systèmes techniques existant ainsi que des normalisations, telles que la norme NF P 99-610 traitant des « *caractéristiques de robustesse et de stabilité des bancs publics* » qui propose un protocole de test du mobilier urbain afin de valider son homologation [NF P 99-610, 1991]. Ce type d'information a permis à l'ergonome et au designer industriel de fixer certains éléments techniques rapidement afin de leur garantir un maximum de solutions réalisables. De plus, le concepteur mécanicien a, sur la base des avant-projets design et des scénarios d'usage, réalisé une première étude produit/process afin de cadrer le développement à venir.

Lors de cette phase du processus, un grand nombre de formalisation d'usage et d'estime ont permis à l'ergonome et au designer industriel de traduire des solutions répondant partiellement ou totalement au problème de conception et de les mettre à disposition de l'équipe projet. Ces formalisations, présentées sous divers formats tels que des dessins, des modèles 3D numériques, des maquettes, ont mis en évidence un problème récurrent : les formalisations utilisées en conception sont généralement spécifiques à chaque métier, ce qui implique des difficultés de coordination des concepteurs. La phase 2 s'est terminée par une évaluation des différentes propositions par les membres de l'équipe projet, ainsi qu'avec l'avis de la commune et de plusieurs utilisateurs. Cette évaluation a pu être réalisée grâce à une mise en commun des formalisations, ainsi qu'une traduction de certaines d'entre elles afin de les rendre facilement compréhensibles par tous.

3.3.3. Phase 3 : Développement de la solution

La phase 3 de développement de la solution s'est déroulée en deux temps. Dans un premier temps, il a fallu sélectionner la meilleure solution conceptuelle issue de la phase 2. Dans un deuxième temps, la solution retenue a pu être développée techniquement, au travers de la prise en compte des composantes mécaniques.

Le choix de la meilleure solution s'est fait au travers d'une étape de confrontation entre les différentes propositions. Ces propositions ont été préalablement traduites en une représentation commune, sous la direction du concepteur mécanicien, l'enjeu étant de permettre à chaque concepteur de comprendre les avantages et inconvénients de chaque concept. Ainsi, différents formats (numérique et physique) ont été utilisés par chacun des trois concepteurs. Le designer industriel s'est en particulier appuyé sur les techniques de prototypage rapide et de maquettage afin de reproduire le produit à échelle réduite, afin de valider l'aspect structurel et visuel (à gauche sur la figure 19). Ces validations préliminaires se sont accompagnées de la modélisation CAO réalisée sur Catia V5 par le concepteur mécanicien (au centre sur la figure 19). Cela a permis de concrétiser la courbure optimale définie par l'ergonome, ainsi que les préconisations avancées par le designer

industriel, concernant l'architecture du produit (principe de lames répétées, espacement entre chaque lame, etc.). Cette concrétisation s'est faite à l'initiative du concepteur mécanicien qui s'est réapproprié les documents fournis par l'ergonome et le designer industriel, et qui, après de multiples itérations, a pu aboutir à un modèle 3D satisfaisant pour chacun.

La solution ainsi retenue est constituée d'une assise et d'un dossier composés de 34 lames en Iroko disposés sur un pied modulable. Cette solution a été choisie car elle permet une gestion du profil selon un plan bien précis, et un assemblage sur mesure, permettant au designer industriel de garantir une esthétique de qualité.

Afin de mettre à l'épreuve la solution retenue, un prototype du profil a été réalisé en mousse rigide afin d'évaluer le confort ainsi que l'ensemble des postures souhaitées. Le prototype, nommé mulet, est visible à droite sur la figure 19. Ce mulet a aussi permis au designer industriel d'évaluer de manière subjective les affleurements et les proportions, afin de valider la solution (visuel et toucher). Nous pouvons citer pour exemple l'équilibre largeur-écart de chaque lame, qui a été fixé à 50mm-10mm. Cette configuration a été choisie après plusieurs itérations réalisées par le designer industriel.

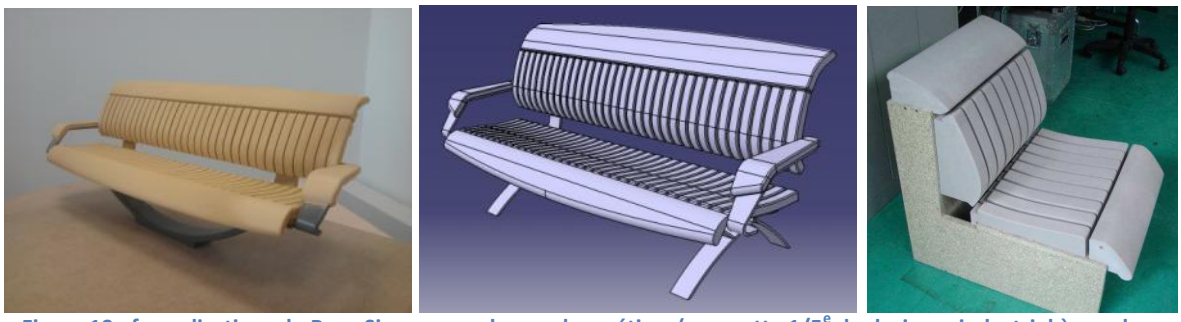


Figure 19 : formalisations du Banc Sirocco par chacun des métiers (maquette 1/5^{e} du designer industriel à gauche, modèle CAO du concepteur mécanicien au centre, mulet échelle 1 de l'ergonome à droite)

Une fois la géométrie figée, les études détaillées ont commencé. L'objectif était de définir l'ensemble des composantes techniques du produit tout en satisfaisant les caractéristiques prédéfinies par chaque métier. Les différentes préconisations de l'ergonome et du designer industriel sont transformées en contraintes par le concepteur mécanicien. La modélisation 3D a été approfondie de manière à améliorer le produit selon des caractéristiques techniques. Par exemple, suite à la demande du designer industriel de réduire l'épaisseur des pieds pour des questions de cohérence esthétique, un calcul de structure a permis de contrôler et valider la modification de géométrie et l'épaisseur des pieds. Lors de chaque redéfinition géométrique, les informations ont été reportées sur la CAO globale, afin de permettre aux deux acteurs (Designer Industriel et Ergonome) d'évaluer l'impact de cette modification sur l'ensemble du produit, avant de valider la modification.

Cette étape extrêmement sensible a été sujette à de nombreuses discussions et à des recherches de compromis entre l'ergonome et le designer industriel, arbitrés par le concepteur mécanicien. C'est pourquoi il a été indispensable de proposer à ces concepteurs des formalisations compatibles entre les différentes cultures métiers, dans le but de favoriser les échanges et le travail en commun.

3.3.4. Phase 4 : Validations

La phase 4 du processus de conception a résidé dans l'évaluation et la validation de la solution développée selon l'ensemble des approches (Ergonomique, Design, et Mécanique). Une première série d'évaluations a été réalisée sur les formalisations physiques (maquette, mullet), ainsi que sur le modèle CAO. Puis, dès lorsque les aspects techniques et de fabrication ont été validés par le concepteur mécanicien, une mise en plan a été réalisée afin de réaliser un prototype fonctionnel (présenté sur les figures 20 et 21).

Une fois le prototype réalisé, une deuxième série d'évaluations a été conduite. Chacun des acteurs s'est approprié le banc Sirocco selon ses propres critères d'évaluation. Le designer industriel a souhaité positionner le banc dans un environnement réaliste, en extérieur, et a tenté de simuler les jeux de lumière sur le produit. L'ergonome a quant à lui évalué le confort d'assise et l'appropriation du produit par des utilisateurs représentatifs au travers de test utilisateurs. Enfin, le concepteur mécanicien a pu dans un premier temps évaluer la procédure d'assemblage et d'installation du produit, et le mettre à l'épreuve dans des conditions limites (efforts, projection d'eau, haute température, etc.). Lors de cette phase de validation technique, le concepteur mécanicien, chef de projet, a été amené à prendre des décisions techniques et à arbitrer des discussions telles que le choix du mode d'assemblage et de revêtement de la structure métallique (soudage puis peinture par poudre époxy), ce qui a engendré une modification, nécessaire, de l'aspect visuel et donc esthétique.

Figure 20 : Assemblage du prototype du Banc Sirocco

Figure 21 : Prototype final du Banc Sirocco

3.4. Résultats et conclusions

3.4.1. Accompagnement des acteurs dans le processus de conception : vers une méthodologie prescriptive multidisciplinaire

Le projet de conception du banc Sirocco nous a permis de mettre à l'épreuve le modèle de conception multidisciplinaire que nous proposons. Nous avons pu souligner en particulier l'importance de la gestion du projet selon quatre phases communes aux trois métiers concernés par notre étude (ergonomie, design industriel et conception mécanique).

> Le modèle proposé de méthodologie globale de conception, constitué d'une approche ergonomique et d'une approche design, autour d'un tronc central de conception mécanique, permet de formaliser les étapes propres à chaque métier (spécifications et recommandations, recherche de solutions, développement et contrôles), ainsi que les étapes communes (formalisations intermédiaires). Ces formalisations tendent à faciliter l'anticipation de l'intégration de l'ergonomie et du design industriel, ce qui valide notre hypothèse d'étude 1a.

La figure 22 représente une schématisation du projet selon trois axes : ergonomie, design industriel et conception mécanique. Elle est structurée selon les quatre phases du processus, de l'étude des besoins jusqu'à la validation d'un prototype. Cette illustration nous permet de mettre en évidence différentes phases de divergence et de convergence. Les divergences débutent d'une formalisation unique et commune à tous les métiers (telle que la formalisation des besoins en repère A de la figure 22) pour atteindre des propositions souvent très éloignées (telles que les recherches créatives en repère C ou les propositions de profil ergonomique en repère D de la figure 22). Durant ces phases de divergence, chaque concepteur peut avancer indépendamment du reste de l'équipe et va chercher des solutions. Les convergences permettent, à partir de ces propositions, de revenir vers une seule représentation du problème de conception. C'est le cas pour le cahier des charges, élaboré lors d'une pré-convergence (repère B de la figure 22), ainsi que pour la modélisation finale (repère E de la figure 22).

Nous soulignons aussi les différents stades d'avancement du projet au travers de formalisations intermédiaires dont l'objectif est de simplifier les confrontations d'idées. Ainsi, dans notre étude, le passage des formalisations créatives du designer industriel (repère C de la figure 22) au modèle final développé par le concepteur mécanicien (repère E de la figure 22), a pu se faire au travers de la réalisation d'une maquette échelle 1/5^{e} permettant une concrétisation des différents schémas initiaux. Du côté de l'ergonomie, le même type de formalisation a permis de passer de la définition

d'un profil ergonomique idéal (repère D de la figure 22) au modèle final (repère E de la figure 22). Cette formalisation permet une évaluation concrète de l'assise et de différentes postures souhaitées. Enfin, les troisième et quatrième phases ont vu le développement technique du produit (repère F de la figure 22) et la validation du produit via un prototype fonctionnel (repère G de la figure 22). Nous pouvons noter l'absence de formalisations intermédiaires permettant à l'ergonome et au designer industriel d'accompagner le passage de la phase 3 à la phase 4. Cela pose un réel problème de compréhension pour ces deux concepteurs car ici, le seul support existant est une formalisation spécifique au concepteur mécanicien.

A ce stade, nous constatons que malgré les efforts faits par le concepteur mécanicien pour traduire les formalisations des autres métiers en une seule commune, il subsiste des étapes où il manque encore des représentations communes. Ce problème apparait en particulier dans les phases de convergences puisque chaque acteur doit se projeter selon ses propres modes de formalisation pour interpréter les propositions des autres. Cela engendre parfois des incompréhensions et des discussions inutiles qui font perdre du temps au projet de conception.

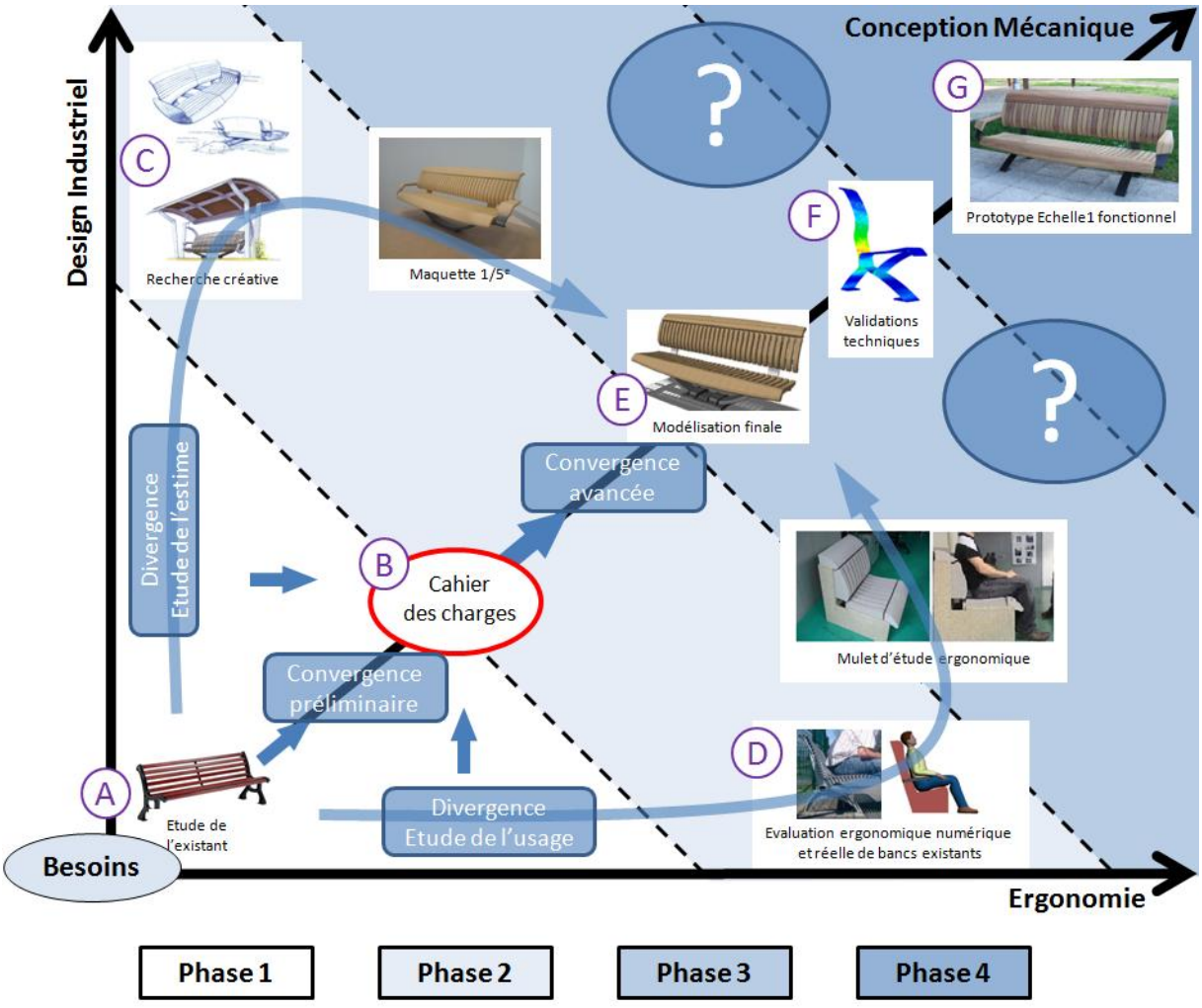


Figure 22. Illustration des étapes de conception d'un banc public [GUER 2009]

3.4.2. Phases de convergence et formalisations intermédiaires

Parmi les différentes phases et étapes de conception relevées sur la figure 22, nous pouvons distinguer les phases de convergence, souvent sources de nombreuses discussions complexes entre les acteurs. En effet, la mise à l'épreuve de notre méthodologie globale de conception nous a permis de souligner les difficultés que rencontrent les concepteurs dans le cadre de convergence faisant intervenir plusieurs disciplines. Dans le processus que nous proposons, il y a deux convergences multidisciplinaires :

- La première, nommée « convergence préliminaire », concerne la définition des besoins, et mène au cahier des charges (repère B). Cette première convergence du processus de conception a pour objectif de définir les différentes fonctions du produit, à partir des recommandations de l'ergonome suite à l'étude des besoins d'usage, et aux recommandations du designer industriel suite à l'étude des besoins d'estime. De plus, ce cahier des charges intègre les nécessités liées à l'aspect technique. Dès la formalisation du cahier des charges, des premières fonctions contradictoires peuvent apparaitre, tel que « Paraître aérien et léger » et « être suffisamment lourd pour ne pas avoir à être fixé au sol ».

- La deuxième, nommée « convergence avancée », concerne la phase de sélection puis de développement technique de la meilleure solution. Nous observons qu'en accord avec notre modèle présenté sur la figure 13 (§II.2.2.4 page 55), à partir de la troisième phase, dernière convergence concernant le concept, il est indispensable que tous les acteurs travaillent ensemble. Il leur faut donc une base saine et commune de travail pour que tous se comprennent. Là encore, l'équipe projet a rencontré des difficultés car chaque concepteur dispose d'outils de formalisation et de modes d'évaluation différents. Il faut donc trouver des formalisations qui permettent à chaque acteur de pouvoir visualiser le produit selon ses habitudes de travail. Ces formalisations doivent aussi permettre à l'ergonome et au designer industriel de pouvoir accompagner le concepteur mécanicien dans la phase de développement et de validation. Or, nous soulignons l'absence de formalisations dédiées à cet accompagnement, puisqu'on passe directement de la modélisation finale (fin de phase 2) au prototype physique (fin de phase 4) en passant uniquement par une formalisation spécifique au concepteur mécanicien. La phase de développement technique n'est donc évaluée que par le concepteur mécanicien (repère F, figure 22), ce qui tend à risquer de diminuer l'impact potentiel de l'ergonome et du designer industriel.

Dans les phases de convergence, le concepteur mécanicien traite les recommandations esthétiques et ergonomiques comme des contraintes de conception à satisfaire.

Alors que dans certains cas, des contraintes ou conflits peuvent entrainer de la créativité, une contrainte non adaptée peut jouer un effet de frein et bridera tous les développements techniques. Ainsi, lorsque les convergences ne se déroulent pas dans des conditions favorables avec des contraintes clairement identifiées, il est nécessaire de réaliser un grand nombre d'itérations entre chaque métier pour obtenir un compromis qui satisfait chacun. Ces itérations auraient pourtant pu être évitées ou réduites à l'aide des outils adaptés, notamment via des formalisations rendant compatibles le travail et la collaboration entre les métiers.

De plus, nous avons pu noter que les phases de convergences engendrent un grand nombre d'interactions multidisciplinaires qui peuvent s'avérer complexe à gérer si elles ne sont pas anticipées. C'est particulièrement le cas lors des étapes de transformation, de confrontation, de recherche de compromis, et de validation de la convergence, que nous définirons et détaillerons par la suite. A ce niveau, un cadre méthodologique nous semble pertinent à proposer pour guider la convergence.

4. Expérience 1B : Identification des interactions multidisciplinaires lors des phases de convergence

4.1. Introduction

La mise à l'épreuve de la méthodologie proposée a permis de mettre en évidence des difficultés d'interactions entre les acteurs de la conception. L'objet de la deuxième expérience de ce volet méthodologique porte sur l'identification et la caractérisation de ces interactions multidisciplinaires qui apparaissent lors des phases de convergence. L'enjeu est de pouvoir intégrer pleinement dans le processus de conception les interactions entre les métiers concernés (ergonomie, design industriel et conception mécanique), puis, pour les cas difficiles, de mettre en œuvre des méthodes et des outils spécifiques permettant de meilleurs échanges. Dans le cadre de cette expérimentation, l'hypothèse que nous posons est la suivante :

> Hypothèse 1b de l'étude : Une meilleure connaissance et une meilleure formalisation des interactions entre les métiers d'ergonomie, de design industriel, et de conception mécanique, permettent d'améliorer la collaboration dans les phases de convergence du processus de conception.

L'objectif est d'identifier les éléments qui peuvent être la cause des difficultés d'échanges afin de permettre une meilleure coordination des métiers d'ergonomie, de design industriel et de conception mécanique dans le cadre de notre méthodologie globale de conception.

4.2. Protocole

Parmi les différents projets réalisés dans le cadre d'INTERREG, nous avons étudié en particulier les différentes interactions multidisciplinaires sur l'un d'entre eux : le projet de conception de la chaise longue Breva. Le projet a été initié par l'idée originale redéfinissant les espaces publics de détente (souvent peu confortables, ce qui entre en contradiction avec l'idée de détente). Est donc venue l'idée de « chaise longue publique ». L'objectif était à la fois de répondre au besoin de confort postural, mais aussi de s'adapter à tous les usages courant du mobilier urbain (lecture, discussion en vis-à-vis, etc.). La composante esthétique a été aussi particulièrement soignée.

L'équipe projet est une nouvelle fois constituée de 3 acteurs métiers que sont l'ergonome, le designer industriel et le concepteur mécanicien. La phase d'industrialisation n'est pas étudiée. L'objectif est d'atteindre la phase de validation technique sur un prototype fonctionnel. Dans le cadre de cette expérience, nous n'étudions que les interactions faisant intervenir le concepteur mécanicien (les interactions entre le designer industriel et l'ergonome pouvant intervenir dans les phases amont du processus ne sont pas prises en compte).

Le projet a été conduit conformément à la méthodologie indiquée dans le paragraphe II.2.2. En accord avec notre positionnement scientifique, le designer industriel a été affecté aux tâches relatives à l'estime du produit, l'ergonome à l'usage et le concepteur mécanicien a traité les éléments techniques. La gestion du projet a été confiée au concepteur mécanicien.

Des observations ont été réalisées durant les revues de projet, ainsi que dans le cadre d'entretiens réalisés avec chacun des acteurs. L'ensemble des formalisations supports d'échange, a pu être étudié durant et à la fin du projet.

4.3. Réalisation : étude des interactions multidisciplinaires

Tout comme la première expérience, nous définissons un processus composé de quatre phases : l'étude et l'analyse des besoins, la recherche de solutions, le développement de la solution, et les validations.

4.3.1. Phase 1 : Etude et analyse des besoins

La première phase du processus a été l'étude et l'analyse des besoins. L'idée initiatrice du projet vient du principe de détente dans les espaces publics urbains. Jusqu'à aujourd'hui, cette détente

n'était possible que grâce à des bancs publics. Or le produit représentant le mieux la détente d'après le groupe projet est la chaise longue. L'idée d'une chaise longue publique est donc apparue très naturellement au sein de l'équipe et a donné lieu à un sujet de conception.

Cette première phase s'est donc basée sur une étude des situations d'usage et sur les produits existants, avec entre autre les bancs publics, et les chaises longues du commerce. L'équipe projet a ciblé, dans un premier temps, les besoins, les attentes, ainsi que les caractéristiques des futurs utilisateurs potentiels du produit. L'ergonome a conduit une étude des différents usages des produits existants sur le terrain dans le but d'en dégager des besoins d'usage. Il a pu ensuite mener une étude avancée des caractéristiques humaines en termes d'anthropométrie ainsi qu'une évaluation du confort optimal, sur la base d'un ensemble de normes et de travaux scientifiques [GOOS 1995]. L'ergonome a ensuite proposé une étude de l'ensemble des scénarios d'usage de la chaise longue afin de concevoir un produit intégrant tous les usages possibles, comme présenté sur la Figure 23.

Figure 23 : Scénarios d'usage de la chaise longue Breva

En parallèle, le designer industriel a conduit une étude du style dans le but de définir les tendances du marché. Un ensemble de croquis et schémas prospectifs lui a permis de définir plusieurs axes thématiques.

4.3.1.1. Interactions concernant le planning

Durant la phase d'étude des besoins, de nombreux échanges ont pu être observés entre le designer industriel et le concepteur mécanicien, ainsi qu'entre l'ergonome et le concepteur mécanicien. Ces échanges ont, dans un premier temps, porté sur la gestion du projet, notamment en termes de planning. En effet, l'étude des besoins a engendré une définition du plan d'action, réalisée par le concepteur mécanicien. Lors de cette phase, le concepteur mécanicien a donc identifié les besoins d'usage et d'estime étudiés par l'ergonome et le designer industriel. De plus, son objectif a été d'anticiper au mieux, et malgré le peu d'informations disponibles, les besoins de conception, en termes de délais et de ressources (humaines, financières, matérielles).

4.3.1.2. Interactions concernant le Cahier des Charges

Une fois les besoins définis, le cahier des charges a permis de formaliser les objectifs qualitatifs et quantitatifs ciblés. Certains besoins d'usage et d'estime ont pu être traduits par le concepteur

mécanicien en fonctions principales, secondaires et contraintes selon la méthode APTE [BRET 2000] (Dimensions anthropométriques, rapports cohérents des sous-ensembles, modalité d'assemblage, etc.). Ces fonctions ont été proposées par chacun des acteurs métier puis structurées par le concepteur mécanicien chef de projet. Ainsi, des premiers échanges ont été observés, car plusieurs fonctions se sont avérées contradictoires (exemple : fonctions relatives au confort et à la souplesse du produit incompatibles avec les fonctions de robustesse et de résistance aux chocs). Afin de résoudre ces contradictions, le chef de projet a procédé à différents arbitrages et à des compromis visant à fixer des objectifs raisonnables et répondant au maximum aux besoins ciblés. Dans d'autres cas, certaines fonctions ont permis de conserver de la souplesse de conception, c'est-à-dire que la marge de manœuvre laissée aux concepteurs était plus grande. C'est par exemple le cas pour le matériau employé, ou pour le revêtement et la peinture. D'autre part, certains éléments, notamment les définitions de tendances, n'ont pas pu être interprétées directement par le concepteur mécanicien et n'ont donc pas été intégrés au cahier des charges. Ces tendances, représentées sous forme de planches, ont été rajoutées dans une section dédiée au designer industriel. De fait, il a été difficile d'atteindre une formalisation unique compréhensible par tous les concepteurs.

4.3.2. Phase 2 : Recherche de solutions

La deuxième phase du processus de conception est une phase de créativité durant laquelle de multiples préconcepts ont pu être proposés (en termes de formes, de matériaux, etc.), comme présenté sur la figure 24. Durant cette phase, des méthodes individuelles et collaboratives de recherche créative ont pu être employées (brainstorming, FAST, générations spontanées, etc.). Dans une phase de recherche de solutions, la quantité prévaut sur la qualité. Il n'y a donc pas eu à gérer de compromis entre les acteurs dans le cadre des recherches collaboratives car toutes les variantes possibles s'ajoutent dans la liste des solutions proposées, et ne seront évaluées que par la suite. Un grand nombre de formalisations ont ainsi pu être proposées, sous forme de croquis et dessins, de modèle 3D CAO, de maquettes en carton, etc. Néanmoins, la deuxième partie de cette phase a consisté à entamer une convergence pour sélectionner une unique solution à développer.

4.3.2.1. Interactions concernant le choix de la solution

Dès lors qu'un nombre suffisant de propositions a été avancé, de manière à ce que toutes les fonctions du cahier des charges soient satisfaites, une convergence a pu être opérée dans le but d'aboutir à une solution acceptable par tous.

Ce choix de solutions à développer s'est fait lors des discussions entre les trois concepteurs. Durant ces discussions, plusieurs propositions ont été combinées, certaines caractéristiques comme

le profil d'assise ou le système de fixation au sol ont rapidement été figées, et d'autres, comme l'épaisseur de chaque pied, ont été volontairement laissées flexibles afin de permettre au concepteur mécanicien d'optimiser au mieux la structure.

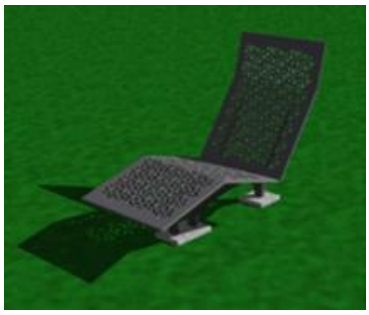


Figure 24 : Exemple de préconcept de la Chaise Longue Breva

4.3.2.2. Interactions concernant la validation Ergonomie – Design Industriel

Une pré-modélisation de validation des solutions les plus pertinentes, telles que celles présentées sur la figure 25, a permis de valider certaines fonctions d'estime touchant à la perception visuelle au travers de rendus réalistes, ainsi que des fonctions d'usage touchant aux postures grâce à l'utilisation de mannequins numériques.

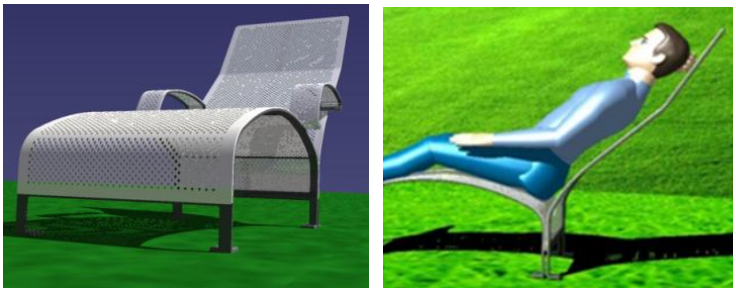


Figure 25 : Pré-modélisation du concept retenu et simulation de postures par un mannequin numérique

Afin d'évaluer le profil d'assise de la chaise longue (impactant sur les fonctions de confort et d'usage du produit), un mulet en bois visible sur la figure 26, a été développé. Une expérimentation conduite sur un échantillon de 7 sujets représentatifs de la taille des différents utilisateurs, en accord avec la norme ISO 15537 intitulée : « Principes de choix et d'utilisation de sujets d'essai pour l'essai des aspects anthropométriques des produits industriels et leur conception » [ISO 15537-2004], a permis d'évaluer l'adéquation entre le profil proposé et l'appropriation du produit. Cette expérimentation a donné lieu à une rectification du profil au niveau de l'appui-tête ainsi que le retrait des accoudoirs pour permettre des postures supplémentaires et faciliter l'accessibilité (et surtout la sortie de la chaise longue). Lors de cette étape de convergence, mettant fin à la phase de recherche de solution, de nombreux compromis ont dû être faits afin de satisfaire au mieux les besoins identifiés. Il est arrivé que des concepteurs prennent des décisions dans le cadre de leur métier, mais impactant l'ensemble de la conception. Par exemple, l'ergonome a pu décider

arbitrairement du retrait des accoudoirs, afin de favoriser l'accessibilité au confort postural. Le chef de projet a accompagné ces prises de décision.

Figure 26 : Mulet fonctionnel en bois de la Chaise Longue

4.3.3. Phase 3 : Développement de la solution

Une fois le profil validé, la phase de développement technique a été réalisée par le concepteur mécanicien, dans le but de confirmer les solutions d'usage (profil, accessibilité, etc.) et d'estime (matériaux, formes générales, etc.) définies par l'ergonome et le designer industriel. Ce développement technique a pu être conduit via une modélisation CAO sur le logiciel CATIA V5. Cette formalisation des solutions techniques telles que celle présentée sur la figure 27, a permis une validation mécanique théorique du système, dans les conditions d'usage définies (dimensionnement, calcul de structure, validation des matériaux, assemblage, etc. comme présenté sur la Figure 28) ainsi qu'une évaluation des solutions relatives à l'estime (perception des affleurements, allure générale du produit).

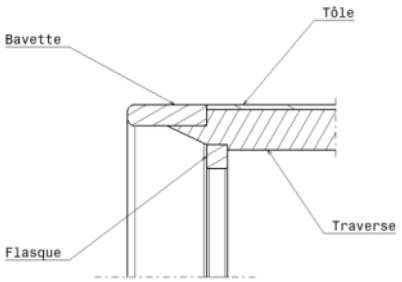


Figure 27 : Système de fixation "Bavette-Flasque-Traverse"

Figure 28 : Calcul de structure réalisé sous CATIA V5 pour la Chaise Longue Breva

4.3.3.1. Interactions concernant le contrôle du respect des spécifications

Durant cette phase, l'ergonome et le designer industriel ont suivi le développement et accompagné les décisions prises par le concepteur mécanicien dans le but de respecter au mieux les objectifs fixés. Malheureusement, le développement étant essentiellement porté par le concepteur mécanicien, il a été très dur pour eux d'assurer un bon contrôle du respect des spécifications d'usage et d'estime. A ce niveau, les interactions observées n'ont été que faibles et sans outils de support.

4.3.4. Phase 4 : Validations

La dernière phase du processus de conception a consisté à valider le produit conçu, suivant l'ensemble de ses aspects (usage, estime et technique) à travers la réalisation d'un prototype fonctionnel (Figure 29).

4.3.4.1. Interactions concernant la validation collégiale du prototype

Durant cette étape finale de validation, les acteurs ont contrôlé ensemble le respect de chacune des caractéristiques du produit propres à leur corps de métier. Lors de cette validation, des modifications ont pu être apportées, mais pour cela, il a été nécessaire que tous se mettent d'accord au travers de compromis. Par exemple, le concepteur mécanicien a proposé de peindre les éléments avant assemblage pour éviter les contacts métal/métal non peints pouvant entrainer une oxydation prématurée. Cette modification a entrainé une évolution de l'esthétique du profil puisque la fixation des éléments devait être réalisée par rivetage.

Figure 29 : Prototype fonctionnel de la Chaise Longue Breva

4.4. Résultats et conclusions

4.4.1. Caractérisation des interactions entre métiers

Cette étude a montré qu'il était nécessaire de caractériser les interactions afin de favoriser les convergences.

> Les interactions peuvent être considérées comme des formes de contraintes spécifiques à chaque métier, et qui posent problème lorsqu'elles doivent être intégrées par un métier différent. L'étude poussée de ces interactions a permis de favoriser les collaborations, ce qui valide notre hypothèse d'étude 1b.

Afin de mieux appréhender leur intégration, et sur la base des études conduites, nous proposons une caractérisation de ces contraintes. Tout d'abord, nous mettons en évidence un critère de « souplesse », lié entre autre à la notion de hiérarchie dans l'équipe projet. En effet, les contraintes peuvent être considérées comme :

- *Strictes*, de type consigne ou ordre d'un métier vers un autre, avec un caractère indiscutable et définitif,
- *Souples*, de type recommandations ou spécifications d'un métier vers un autre, avec un caractère constructif et évolutif.

Cette notion de souplesse renvoie à la notion de flexibilité existante dans la littérature traitant de l'analyse fonctionnelle [BRET 2000]. En d'autres termes, il s'agit d'un degré de liberté en conception (tel qu'évoqué dans le chapitre 2, §2.1.2., page 21). D'autre part, lorsque différents métiers convergent lors d'une même phase, on peut voir apparaître plusieurs cas de gestion de ces convergences :

- Soit les contraintes et les solutions apportées sont *indépendantes* et ne posent pas de problème d'intégration,
- Soit elles entrent en contradiction et des solutions sont trouvées suite à des *collaborations* multidisciplinaires plus ou moins complexes.

Ces collaborations peuvent se faire selon plusieurs niveaux, du *compromis* (solutions trouvées par plusieurs acteurs au cours de discussions argumentées) à l'*arbitrage* (solutions subjectives ou objectives choisies par le chef de projet).

4.4.2. Interactions, métiers et outils

L'ensemble des interactions caractérisées, sous forme de contraintes, sont représentés sur la figure 30, selon deux critères : la souplesse de degré de liberté, et le niveau de collaboration (les éléments indépendants n'ont pas été pris en compte car non contraignants).

Globalement, nous observons sur la figure 30 que, durant la phase 1, les collaborations sont extrêmement encadrées par le chef de projet lors de la définition du contexte du projet et de la mise en œuvre du cahier des charges. En effet, dans le cas de la validation des besoins, toute divergence de point de vue entre les acteurs implique une prise de décision stratégique par le chef de projet. Par exemple, la question de répondre à un besoin de luxe ou de grand public ne peut se traiter que par arbitrage du chef de projet, une étude marketing n'ayant pas été réalisée. Il en est de même pour la définition des fonctions et des critères de valeur du cahier des charges. En effet, en cas de confrontation de plusieurs fonctions dont les critères sont incompatibles (légèreté et solidité par exemple), des choix amont de conception doivent être réalisés par arbitrage. A la différence de la définition du planning qui peut rester souple et évolutive, la définition du cahier des charges est stricte et ne permet aucune marge de manœuvre autre que celle indiquée dans le cahier des charges (degré de flexibilité évoqué dans la méthode APTE [BRET 2000]).

La phase 2, de recherche de solutions, permet beaucoup plus de liberté dans les collaborations. En effet, l'état d'avancement du projet permet une large divergence et donc, des interactions souples dans l'évaluation par chaque concepteur, des propositions avancées. Cette évaluation constitue une mise à l'épreuve de chaque proposition par l'ensemble des acteurs, afin de valider l'ensemble des aspects (d'usage, d'estime, et techniques). Cette évaluation constructive, ayant pour mission d'améliorer les solutions, est donc caractérisée de souple (cf. figure 30). Par contre, le choix de la solution à développer, qui est réalisée lui aussi dans le cadre d'un compromis entre les concepteurs, est strict. En effet, l'objectif de cette étape est de valider une seule solution à développer sans avoir à revenir sur la question par la suite.

La phase 3 est une phase dans laquelle il y a relativement peu d'interactions. En effet, lors du développement technique assuré par le concepteur mécanicien, un suivi a été réalisé par l'ergonome et le designer industriel, afin d'assurer dans les meilleures conditions possible, le respect des spécifications. Malheureusement, le manque de moyens d'interactions a limité l'impact de cette étape. Ces interactions sont caractérisées de souple (cf. figure 30) car l'enjeu est de faire évoluer le produit peu à peu pour le faire entrer pleinement dans le cahier des charges de manière optimale.

Enfin, la phase 4, de validations, est réalisée dans le cadre d'interactions strictes (cf. figure 30). En effet, chaque métier doit s'engager sur ses propres critères, afin de valider le produit final. Nous

remarquons qu'en cas de désaccord entre deux acteurs, la collaboration peut finir par un arbitrage du chef de projet, ou, plus souvent, d'un test utilisateur, via la réalisation d'un prototype fonctionnel comme cela a été le cas dans le projet observé.

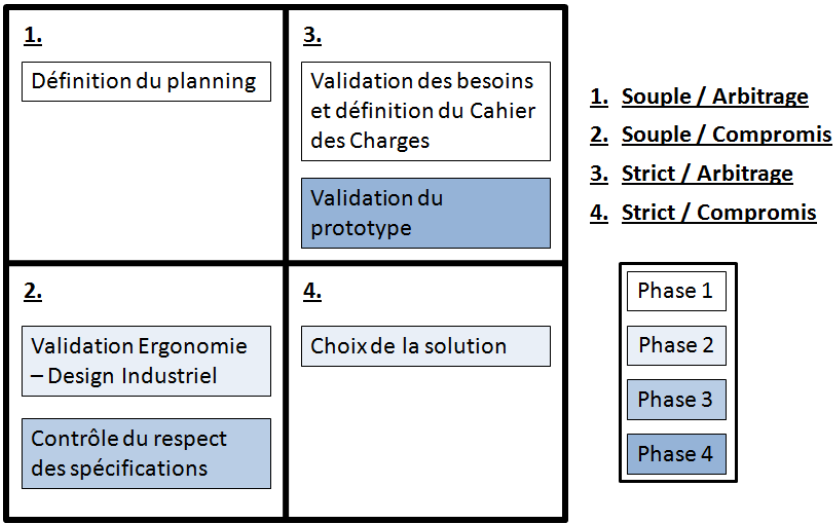


Figure 30 : Caractérisation des interactions multidisciplinaires, Degré de liberté / Niveau de collaboration

Ainsi, nous mettons en évidence des phases où l'équipe de conception dispose de liberté d'action et des phases plus strictes où un arbitrage permet de faire des choix rapidement. D'après nos observations, les interactions les plus complexes interviennent essentiellement lors des phases où des compromis sont nécessaires, c'est-à-dire de l'évaluation des propositions conceptuelles, du suivi du développement technique et de la sélection du concept retenu (essentiellement durant les phases 2 et 3). Cette complexité semble venir du fait que les formalisations utilisées par chaque acteur, ne sont pas toujours exploitables par un autre acteur. De ce fait, les discussions se basent sur des critères et des formalisations différentes d'un même objet.

4.4.3. Des formalisations complexes

La principale difficulté que rencontrent les acteurs de la conception lors de la mise en commun de leurs formalisations réside dans le fait qu'elles se basent sur des outils et des cultures différentes. Parfois, ces cultures et ces outils sont incompatibles. Par exemple, le designer industriel va élaborer son cahier des charges sur la base de plusieurs mots définissant le contexte de création du produit et l'ambiance souhaitée (pour un mobilier urbain, on pourra parler de légèreté, de fluidité, de chaleur, de confort, etc.). Dès qu'il centralise ces données, le concepteur mécanicien est confronté à des difficultés de traitement de ces « fonctions » issues de l'approche design industriel car il est habitué à traiter des données chiffrées moins abstraites. Cette problématique concerne aussi les phases de convergence. Les propositions sont modélisées avec des approches différentes et les acteurs ne se basent pas sur les mêmes critères pour évaluer un concept car le problème n'est pas formalisé de manière similaire (cahier des charges fonctionnel pour le concepteur mécanicien, brief design pour le

designer industriel, et spécifications ergonomiques pour l'ergonome). Il devient ainsi très difficile de réaliser des compromis dans des référentiels différents.

Cette deuxième approche expérimentale nous permet d'autre part de disposer sur le modèle précédemment proposé en page 52, les différentes interactions observées et étudiées. Le modèle initial modifié, visible sur la figure 31, met donc en évidence des échanges caractérisés, opérés tout au long du processus. Sur cette figure, les doubles flèches représentent les interactions observées, qui sont pour la plupart des contraintes. Du fait de notre positionnement, ces interactions concernent essentiellement les relations Ergonome – Concepteur Mécanicien, et Designer Industriel – Concepteur Mécanicien. Nous nous orientons donc vers la recherche d'outils et de méthodes permettant au Concepteur Mécanicien d'intégrer les travaux du Designer Industriel et de l'Ergonome, mais aussi de faciliter la collaboration entre les métiers. L'enjeu est de permettre à ces deux experts de ne pas modifier leurs habitudes de travail tout en aidant le concepteur mécanicien à mieux intégrer les contraintes liées à l'ergonomie et au design industriel lors des phases de convergence. Par souci de clarté, ce modèle est représenté sous une forme simplifiée sur la figure 31.

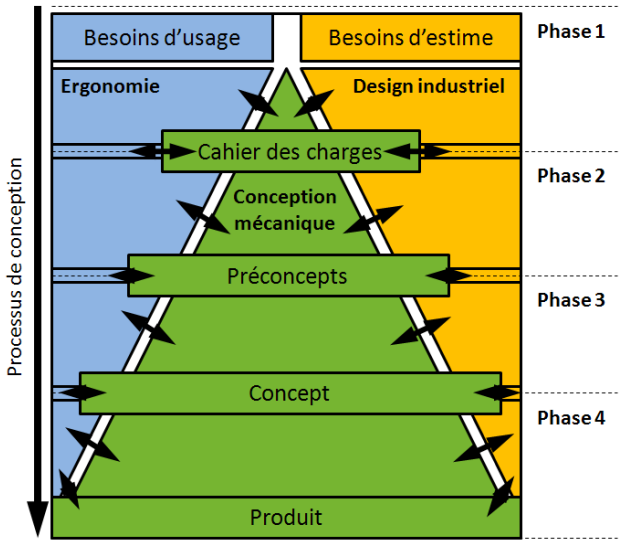


Figure 31 : Modèle global de conception intégrant les interactions multidisciplinaires

5. Conclusions, discussions et deuxième hypothèse de recherche

5.1. Conclusion de l'approche méthodologique

Ce premier volet expérimental nous a permis de mettre à l'épreuve une nouvelle méthodologie dans le cadre de différents projets de conception de produits de type mobilier urbain. Nous avons pu nous focaliser sur certaines étapes du processus de conception, telles que les divergences et les convergences, ainsi que sur la gestion des collaborations entre les différents métiers, souvent

sources de problèmes complexes à gérer. Dans un deuxième temps, nous avons pu caractériser plus finement les interactions multidisciplinaires.

5.1.1. Compromis entre des valeurs d'usage et d'estime et des valeurs techniques

Les premiers résultats de cette expérience permettent en particulier de mettre en évidence le lien étroit existant entre les besoins d'usage et d'estime d'une part, et les conséquences techniques qu'ils engendrent, tout au long du processus de conception. Nous avons défini notre modèle sur une approche idéale où le projet était initié sous l'impulsion d'une étude des besoins d'usage et d'estime, considérés plus tard par le concepteur mécanicien comme des contraintes de conception. Nous avons néanmoins conscience que les réalités industrielles imposent souvent aux entreprises de définir un contexte de conception. Ce contexte de conception, parfois lié à un process imposé, ou à des ressources humaines limitées, engendre des modifications de l'action de conception, dont il faut tenir compte dès le lancement du projet. C'est au chef de projet d'intégrer ces éléments dans sa planification.

En cas de process imposé, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, nous avons pu observer que l'absence d'un degré de liberté vis-à-vis d'un matériau ou d'un procédé de fabrication, entrainait quasiment instantanément une dégradation des valeurs d'usage et d'estime. En effet, dans les phases amont du processus, l'ergonome et le designer industriel ont défini des idéaux à atteindre en termes d'usage et d'estime. Or, si ces idéaux sont définis sans tenir compte d'un matériau inaccessible (en termes de coûts, de ressources écologiques, etc.), alors il sera nécessaire de réaliser un compromis ou un arbitrage afin d'aboutir à une solution viable.

Le cas observé a été celui de l'industrialisation du banc Sirocco. Une entreprise intéressée par cette industrialisation a mis à disposition l'ensemble d'un process de tôlerie. Il a donc fallu adapter le produit à ce nouveau procédé de fabrication sachant que le banc initial était réalisé en bois. Sur la figure 32, le banc Sirocco d'origine. Une fois que le process a été pris en compte, le produit a été totalement modifié. Néanmoins, l'ergonome et le designer industriel ont souhaité maintenir un maximum d'éléments d'usage et d'estime déjà définis, tels que la courbure générale de l'assise, ou l'idée de lame verticale. Ainsi, le banc de la gamme Zéphyr (figure 33), a pu être développé et industrialisé.

Figure 32 : Banc Sirocco (produit référent)

Figure 33 : Banc Zephyr (contrainte de production)

Nous avons pu observer que l'existence d'un contexte technique avait un impact direct sur les fonctions d'usage et d'estime, ainsi que sur les solutions techniques développées afin de répondre aux besoins.

Ce contexte technique joue aussi un rôle sur les modes d'intégration de l'ergonomie et du design industriel. En effet, ce contexte permet de définir qui dans le projet assure le leadership. Lors des phases amont, ce leadership est assuré par l'ergonome et/ou le designer industriel, qui sont les mieux placés pour étudier les besoins des utilisateurs et le futur souhaitable du produit. Nous notons que plus il y a de liberté dans la conception, plus le leadership est laissé à l'ergonome et au designer industriel. Par la suite, lors du développement, c'est le concepteur mécanicien qui reprend le leadership afin d'assurer la faisabilité technique et la réussite industrielle de la conception. La question de transfert de ce leadership est étroitement liée à la notion d'intégration des métiers. Restent à savoir comment se réalise ce transfert de leadership, à quel moment il intervient et dans quelles conditions. Nous proposons deux visions de ce transfert de leadership (Figure 34) :

- Dans un projet dit « créatif », le transfert se fera tardivement, laissant un maximum de liberté à l'ergonome et au designer industriel, afin de garantir une créativité maximale,
- Dans un projet dit « technique », le transfert se fera très rapidement afin de garantir dès que possible la faisabilité du produit, et d'assurer une optimisation de la solution retenue afin de répondre aux contraintes industrielles.

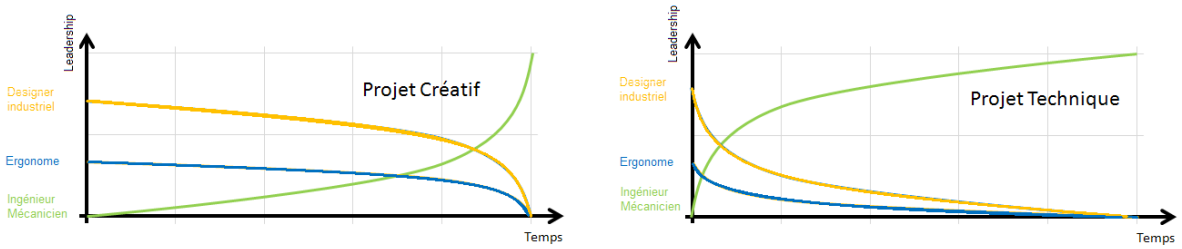


Figure 34 : Transfert du leadership au cours du projet de conception

5.1.2. Les formalisations d'aide à la convergence

La complexité de ces convergences réside dans le fait qu'elles ne peuvent pas être traitées de la même manière selon les métiers considérés. Chaque convergence se base ainsi sur différentes formalisations qui permettent aux concepteurs d'atteindre ensemble les objectifs de conception fixés. Ainsi, nous avons observé quatre types de convergences, représentés sur la figure 35 :

- Conception Mécanique – Ergonomie
- Conception Mécanique – Design Industriel
- Design Industriel – Ergonomie
- Conception Mécanique – Design Industriel – Ergonomie

Afin d'aider les différents métiers lors de ces phases de convergence, différentes formalisations sont utilisées. Certaines ont pour but de permettre à un concepteur de mettre en avant une de ses propositions, d'autres ont pour but de présenter ces propositions à l'ensemble de l'équipe projet. C'est pourquoi nous introduisons la notion de formalisation propre et formalisation mixte (cf. figure 35).

> Les **formalisations propres** sont les formalisations utilisées régulièrement par chacun des concepteurs, de façon spécifique à son métier. C'est par exemple le cas du croquis pour le designer industriel, du scénario d'usage pour l'ergonome ou encore de la modélisation 3D numérique pour le concepteur mécanicien.
>
> Les **formalisations mixtes** sont des formalisations utilisées simultanément par plusieurs concepteurs afin de présenter selon un même modèle commun, une proposition. L'enjeu est de faciliter les échanges entre les métiers.

Ces formalisations mixtes posent de nouveaux problèmes car au-delà d'être une Formalisation Intermédiaire au sens de nombreux auteurs [BOUJ 2003], c'est-à-dire un outil de représentation, de traduction et de médiation [PASC 2006], elles doivent permettre à des métiers de cultures différentes de converger ensemble vers une solution unique.

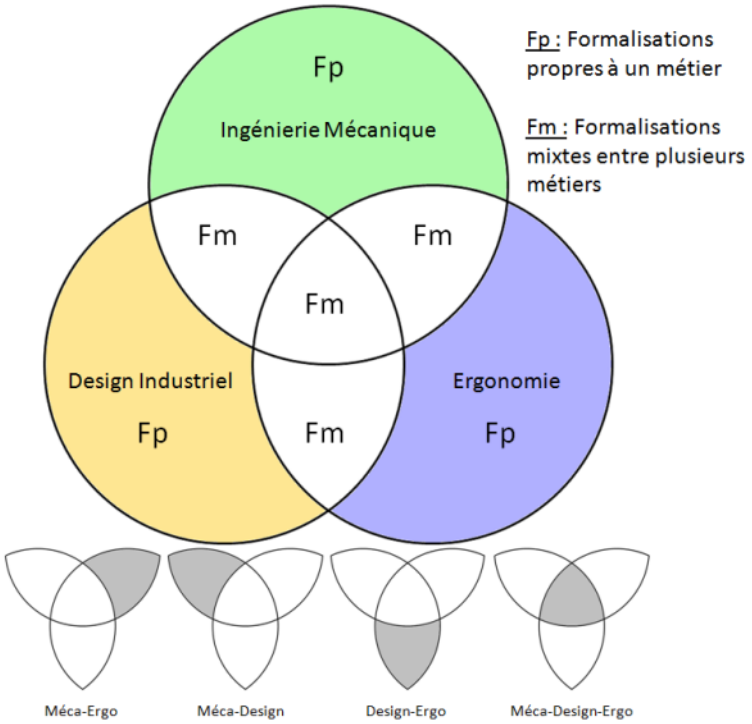


Figure 35 : Différents types de convergences multidisciplinaires

Les convergences qui nous intéressent plus particulièrement sont celles qui font intervenir le concepteur mécanicien, car c'est d'après notre positionnement lors de ces convergences que l'ergonomie et le design industriel sont intégrés dans le processus de conception mécanique.

5.1.3. Modèle final

Les expérimentations conduites dans le cadre du projet INTERREG nous ont permis de reprendre notre modèle de conception (figure 13, page 55) afin de l'améliorer en précisant un certain nombre d'étape propres à chaque métier, ainsi que les interactions multidisciplinaires. En résulte la méthodologie prescriptive présentée sur la figure 36.

Nous faisons en particulier intervenir la notion de cahier des charges conceptuel, évoqué par Quarante [QUAR 2001]. Ce cahier des charges se veut plus léger que le cahier des charges fonctionnel de la méthode APTE [BRET 2000], et reste donc pratique pour la formalisation des objectifs de conception pour le designer industriel et l'ergonome. Ce n'est qu'à partir de cette formalisation que le concepteur mécanicien entame son activité de conception, par une analyse fonctionnelle. Sur la base des préconisations de l'ergonome et du designer industriel, il met au point le cahier des charges fonctionnel. En parallèle, l'ergonome et le designer industriel commencent la phase de recherche de solutions.

De plus, nous mettons l'accent sur les formalisations qui permettent le passage d'une phase à l'autre. Ces formalisations sont les supports de discussions entre les métiers et se doivent d'être compréhensibles par chacun d'entre eux. L'intérêt d'avoir défini les interactions existantes entre

chaque métier durant ces phases permet donc en particulier d'étudier les outils et méthodes de formalisation dans le but de faciliter les convergences. Nous détaillons ces éléments dans la partie suivante.

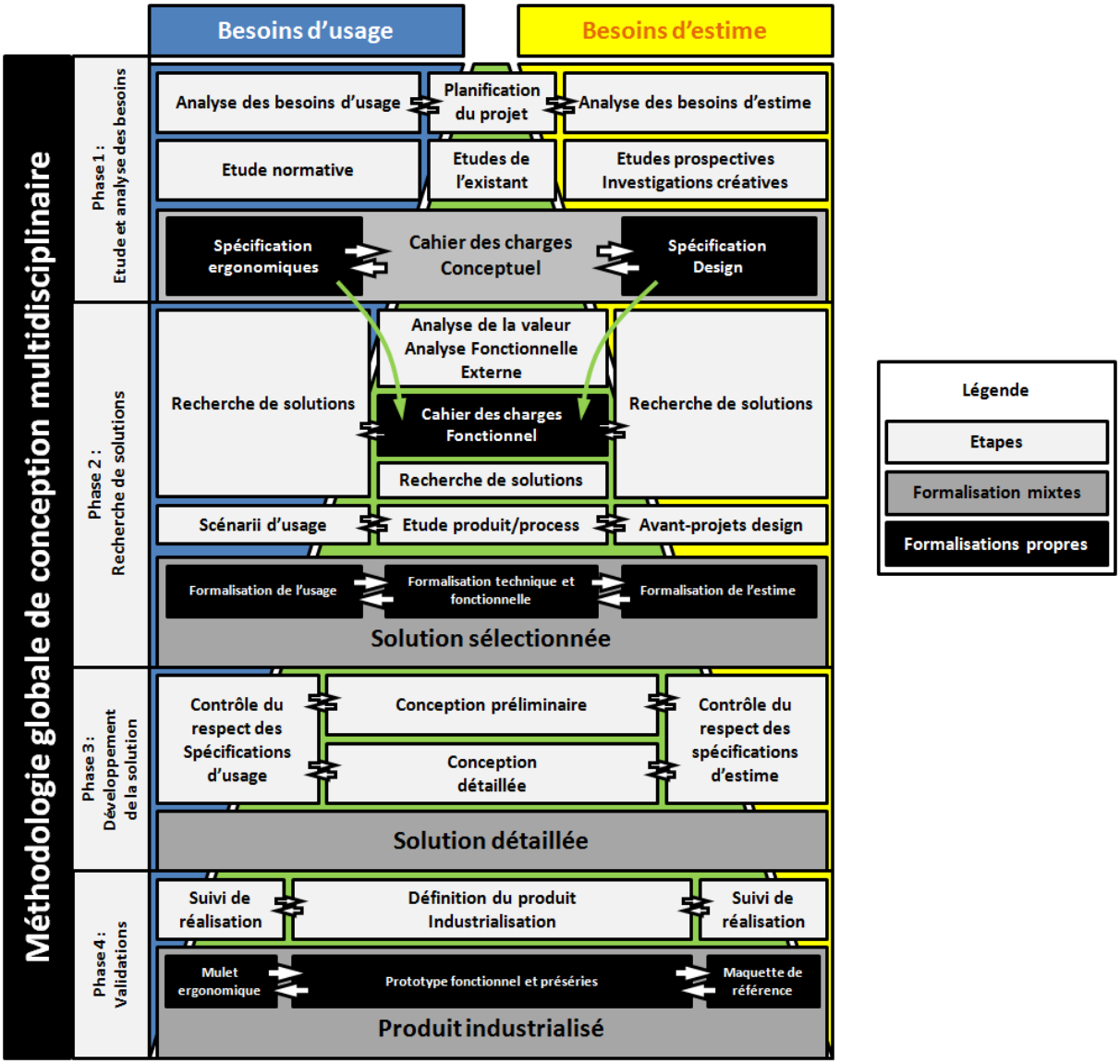


Figure 36 : Modèle global de conception implémenté

Les deux premières expérimentations nous ont permis d'établir que la mise en place d'une méthodologie multidisciplinaire dans laquelle les interactions entre les différents concepteurs étaient caractérisées, permet de favoriser les échanges et de faciliter l'intégration de l'ergonomie et du design industriel. Nous validons ainsi notre première hypothèse de recherche. Nous soulevons néanmoins une question relative aux manques d'outils supports de ces échanges et interactions.

5.2. Difficultés d'échanges et d'interactions : vers plus de Formalisations Intermédiaires Mixtes

5.2.1. Améliorer les interactions multidisciplinaires de type Conception Mécanique – Design Industriel ou Conception Mécanique – Ergonomie

Les interactions étudiées ont permis de mettre à jour des pratiques courantes et complexes, qui jusqu'à présent, étaient gérées au cas par cas par les équipes de conception. Les différents acteurs ne sont pourtant pas armés pour assurer ces échanges multidisciplinaires.

Parmi ces échanges, trois cas de figure on pu être dégagés :

- L'incohérence de formalisations lors du transfert de données d'un métier à l'autre (figure 37),
- L'incompatibilité de formalisations lors des phases de convergence (figure 38),
- L'incompréhension d'une formalisation lors des phases d'évaluation (figure 39).

L'incohérence entrée-sortie vient du fait que les acteurs de la conception travaillent avec des méthodes très différentes et sur des supports différents (Figure 37). Ainsi, le designer industriel peut être amené à réaliser un ensemble de croquis (données non quantifiées), alors que le concepteur mécanicien a besoin quant à lui de caractéristiques géométriques (dimensions, précision des formes, etc.). Ainsi, la Donnée de Sortie d'une phase 1 durant laquelle un acteur 1 a réalisé une action, peut être incompatible avec une Donnée d'Entrée d'une phase 2 car l'acteur 2 nécessite un autre référentiel.

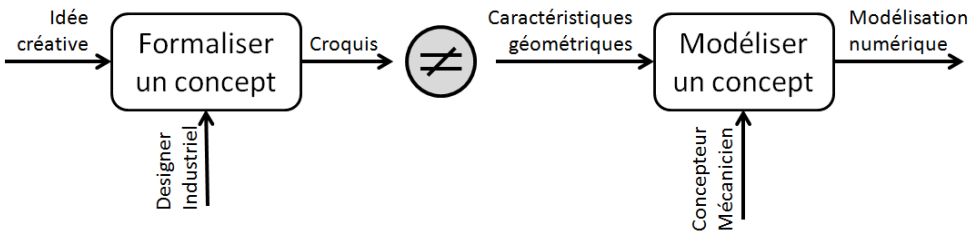


Figure 37 : Exemple d'incohérence de formalisations lors du transfert de données d'un métier à l'autre, représenté selon la norme IDEF0

Un effort peut donc être réalisé sur les moyens de médiation interdisciplinaire afin de garantir un meilleur transfert d'un métier à l'autre de l'ensemble des données. Cela peut passer par des moyens techniques de transformation de format informatique, mais aussi plus simplement par une prise en compte de la culture et des besoins des autres métiers lors de la formalisation en sortie de phase.

Les difficultés lors des phases de convergence sont liées à l'incompatibilité des supports qui est l'un des problèmes les plus fréquemment rencontré. Les acteurs travaillant sur des supports extrêmement variés et différents d'un métier à l'autre, rendent souvent difficiles les confrontations de propositions. Ainsi, il est fréquent de retrouver deux formalisations différentes, portant sur des

aspects variés du produit, qu'il est extrêmement complexe de faire cohabiter dans un même référentiel. Par exemple, la Figure 38 présente un cas de convergence difficile puisqu'à la suite d'une étude des besoins d'usage par l'ergonome et des besoins d'estime par le designer industriel, tous deux doivent centraliser leurs études dans le cadre d'un même cahier des charges souvent complexe à formaliser. Il semble donc intéressant d'approfondir les outils et méthodes de formalisations compatibles, l'enjeu étant de permettre à différents acteurs aux cultures métier éloignées, de converger vers un produit acceptable pour chacun.

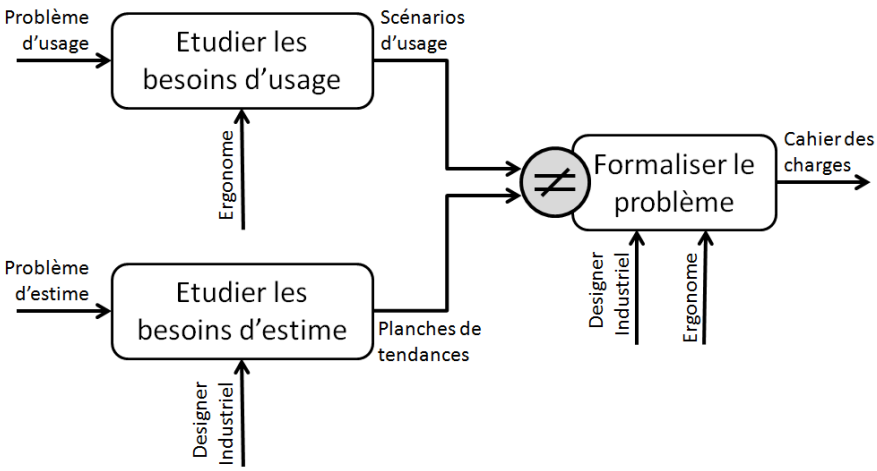


Figure 38 : Exemple d'incompatibilité de formalisations lors des phases de convergence, représenté selon la norme IDEF0

Enfin, la dernière interaction sensible observée arrive plus tard dans le projet de conception, et concerne les phases d'évaluation des produits développés, par l'ergonome et le designer industriel. Là encore, nous nous retrouvons face à une incompréhension des experts qui ne détectent pas forcement dans un concept global, les différents critères sur lesquels ils s'étaient basés initialement. La Figure 39 traduit cette incompréhension : l'ergonome chargé de contrôler le respect des spécifications ergonomiques établies dans la phase d'étude et d'analyse des besoins, doit accompagner le concepteur mécanicien durant sa phase de développement de la solution. Pour cela, il doit pouvoir reconnaitre différents levier de contrôle de ces spécifications, quelque soit l'état d'avancement du développement (modèle 3D, prototype, etc.). Malheureusement, cela est rendu difficile, notamment par le fait que les ergonomes sont rarement formés à l'utilisation des outils de CAO, majoritairement utilisés par les concepteurs mécaniciens.

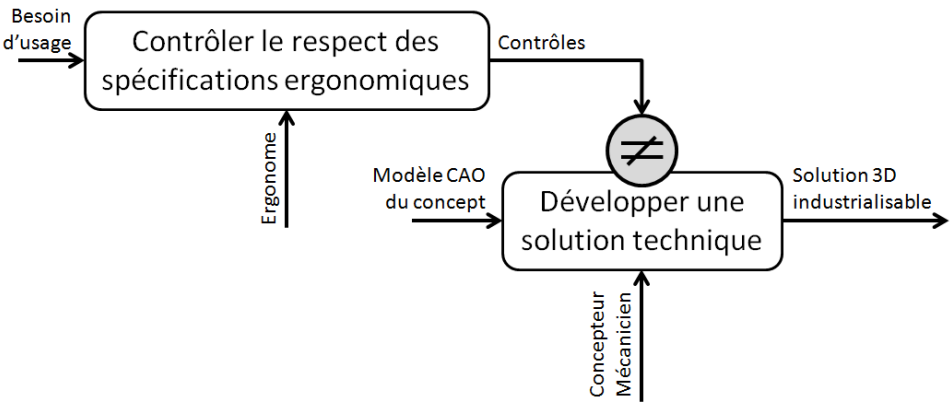


Figure 39 : Exemple d'incompréhension d'une formalisation lors des phases d'évaluation, représenté selon la norme IDEF0

Dans chacun des cas d'interaction évoqués, les notions de traduction, de médiation, ou de communication sont concernées. Si bien que l'une des options possibles pour résoudre ce problème, pourrait être les Formalisations Intermédiaires [PASC 2006], [JEAN 1995] [VINC 1996]. A la fois outil d'aide à la conception, et formalisation d'échange interdisciplinaire, ces formalisations ont pour objectif de s'adapter aux méthodes de chacun des métiers concernés.

5.2.2. Les Formalisations Intermédiaires : moyen d'intégration du design industriel et de l'ergonomie

Les Formalisations Intermédiaires sont des moyens d'échange d'information durant un processus de conception. D'après Mer et coll, elles ont un rôle d'aide à la collaboration des métiers [MER 1995]. D'après Marsot [MARS 2002], ces Formalisations Intermédiaires ne sont pas toujours utilisables par tous les acteurs et c'est ce qui contribue en particulier aux difficultés de prise en compte de l'Ergonomie. Cela semble être aussi le cas en ce qui concerne le Design Industriel. Des travaux sont donc conduits afin de permettre une adaptation des Formalisations Intermédiaires aux spécificités de chaque métier [ROUS 1996]. Certains tentent quant à eux de simplifier les transferts de données entre les acteurs métiers malgré leurs approches différentes [BOUJ 2003].

Notre position à ce sujet est que les Représentations Intermédiaires utilisées dans le cadre de convergences multidisciplinaires doivent répondre à un certain nombre de caractéristique spécifiques. La première est l'aspect *collaboratif* : il faut pouvoir mettre les différents acteurs autour d'une même représentation afin d'augmenter les échanges et d'avancer plus vite dans le processus de conception. Le deuxième critère est la *réactivité du système*, garantissant une évolution de l'objet conçu au fur et à mesure que des modifications sont apportées par l'un des acteurs métier. Enfin, le troisième critère permettant une évaluation optimale d'un objet futur est la capacité de disposer d'un *rendu réaliste*, tant en aspect qu'en mise en situation et en utilisation.

Dans ce contexte nous avons décidé de nous orienter vers l'étude des outils de Prototypage Virtuel pour proposer des Formalisations Intermédiaires qui soient adaptés aux interactions multidisciplinaires [WANG 2002]. En effet, ce domaine d'application semble répondre aux trois caractéristiques nécessaires à une bonne convergence. Le paragraphe suivant réalise un bref descriptif d'un outil de prototypage virtuel que nous avons choisi comme support de formalisation.

5.2.3. Deuxième hypothèse de recherche : La réalité virtuelle comme support de Formalisation Intermédiaire

L'outil de Prototypage Virtuel choisi est la Réalité Virtuelle. Selon Fuchs, « la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit symbolique, soit une simulation de certains aspects du monde réel » [FUCH 1996]. Il en résulte que, dans le cadre de la conception de produit, la réalité virtuelle présente un intérêt tout particulier car elle pourra permettre à une personne d'avoir une activité sensorimotrice avec le modèle numérique (ou prototype virtuel) d'un produit futur pour en évaluer les différentes valeurs d'usage, d'estime ou techniques. De ce point de vue, la Réalité Virtuelle peut être considérée comme un outil de prototypage virtuel qui permet de mieux appréhender les phases de convergence et d'interaction [WANG 2002]. Ainsi, la réalité virtuelle peut alors être envisagée comme un outil support de Formalisations Intermédiaires permettant le travail en commun des acteurs de la conception durant les différentes phases du processus de conception de produit.

Les travaux de Mahdjoub mettent en évidence l'intérêt de la réalité virtuelle dans le processus de conception de l'usage. Véritable outil de formalisation intermédiaire, elle permet aux concepteurs mécaniciens d'échanger plus rapidement et avec plus d'efficacité avec les autres acteurs métiers et en particulier avec l'ergonome [MAHD 2007a]. En ce qui concerne le design industriel, l'utilisation de la réalité virtuelle est plus limitée. Des projets tels que le projet européen SATIN proposent des applications visant à intégrer les aspects formels voire sensoriel des produits le plus tôt possible dans la conception, et ce via des outils de réalité virtuelle [BORD 2006]. Ainsi, la réalité virtuelle a pu montrer sa pertinence dans de multiples cas de conception centrée sur l'utilisateur. En effet, il apparait que tout au long de ce processus de conception, la réalité virtuelle peut être un outil utile pour la conception multidisciplinaire, cependant peu d'auteurs [FISH 2004] intègrent la réalité virtuelle comme un outil à part entière pouvant être utilisé aux différentes étapes du processus de conception des produits et par conséquent elle est sous exploitée durant les phases de convergence.

Ainsi, notre deuxième hypothèse de recherche nous permet de nous positionner dans une convergence multidisciplinaire, appliquée aux métiers d'ergonomie, de design industriel et de conception mécanique, aidée par la Réalité Virtuelle.

Deuxième hypothèse de recherche : **Le développement de nouveaux outils de Formalisation Intermédiaire, notamment basés sur les technologies de Réalité Virtuelle, permet une meilleure gestion des phases de convergences entre l'ergonomie, le design industriel et la conception mécanique.**

CHAPITRE 4 :
LA REALITE VIRTUELLE COMME OUTIL D'AIDE A LA CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE

1. Introduction

Ce quatrième chapitre se propose d'enrichir la méthodologie globale de conception multidisciplinaire présenté dans le précédant chapitre. Pour cela, nous proposons d'introduire la Réalité Virtuelle comme outil de Formalisations Intermédiaire, extrêmement pertinente selon nous pour intégrer dans les meilleures conditions les expertises métiers de l'ergonome et du designer industriel.

Pour cela, nous tenterons de répondre à notre deuxième hypothèse de recherche :

> Rappel de la deuxième hypothèse de recherche : **Le développement de nouveaux outils de Formalisation Intermédiaire, notamment basés sur les technologies de Réalité Virtuelle (RV), permet une meilleure gestion des phases de convergences.**

Nous cherchons ainsi à mettre en avant l'intérêt de positionner de nouvelles Formalisations Intermédiaires dans une méthodologie multidisciplinaire. Nous nous orientons en particulier vers les technologies de Réalité Virtuelle, qui présentent de nombreux atouts en termes de collaboration, de réactivité et d'immersion.

En accord avec la littérature évoquée dans le chapitre 2, nous définissons la convergence comme une mise en accord de plusieurs acteurs de la conception, sur ces différents aspects, menant à une validation (partielle ou totale) de ces aspects.

Ce chapitre se propose dans une **deuxième partie**, de positionner la Réalité Virtuelle comme un outil capable de présenter différentes Formalisations Intermédiaires enrichissant notre méthodologie multidisciplinaire. Pour cela, une première expérimentation est présentée en faisant un zoom sur les phases de développement technique uniquement. Cette expérimentation est conduite dans le cadre d'un projet de conception d'un petit véhicule urbain biplace à motorisation électrique, nommé F-City, et produit par l'entreprise FAM. Nous détaillons deux exemples concrets de convergence Ergonomie – Conception Mécanique et Design Industriel – Conception Mécanique.

Dans une **troisième partie**, une deuxième expérimentation est présentée. Elle vise à étudier plus précisément la convergence Design Industriel – Conception Mécanique, tout au long du processus de conception, et à positionner la Réalité Virtuelle dans ces phases. Le projet supportant cette expérimentation est un projet de conception d'un banc de test de carte électronique. Ce projet nous permet de mettre en évidence différentes convergences multidisciplinaires existantes et le rôle que la Réalité Virtuelle a pu jouer dans le cadre de ces convergences.

Dans une **quatrième partie**, nous concluons sur cette approche opérationnelle. Nous orientons ensuite les discussions vers notre troisième hypothèse de recherche concernant la mise en place d'une nouvelle méthodologie de convergence multidisciplinaire.

2. Expérience 2A : Positionnement de la RV dans un projet de conception multidisciplinaire – Projet FCity

2.1. Objectifs et contexte

Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi d'étudier le positionnement de la réalité virtuelle dans un processus de conception multidisciplinaire (cf. page 81). Pour cela, nous avons déployé notre méthodologie globale de conception dans le cadre d'un projet de conception d'un véhicule urbain afin d'étudier le rôle et le positionnement de la réalité virtuelle dans des contextes de convergences de type Ergonomie – Conception Mécanique ou Design Industriel – Conception Mécanique. L'hypothèse de l'étude conduite est donc la suivante :

> Hypothèse 2a de l'étude : la Réalité Virtuelle est un outil de formalisation intermédiaire qui permet d'améliorer les phases de convergence Ergonomie – Conception Mécanique et Design Industriel – Conception Mécanique.

Le projet support de cette expérimentation, nommé F-City, est porté par l'entreprise FAM, équipementier automobile du Doubs (25). Il consiste en la conception, le développement, la fabrication et la commercialisation d'un petit véhicule urbain électrique de deux places assises (cf. figure 40). Dans le cadre de la conception de ce produit, le laboratoire Systèmes et Transports de l'UTBM, au travers de l'équipe d'ERgonomie et de COnception des Systèmes, a été sollicité pour la conception et le développement de plusieurs éléments (châssis, siège, interfaces de tableau de bord, configuration matériaux/textures/couleurs), ainsi que la mise à l'épreuve et l'évaluation d'autres éléments (champs de vision et de rétro vision, position des composants du tableau de bord, accessibilité et assises, etc.). Nous concentrons notre étude sur la phase 3 de développement de la solution retenue. Nous étudions en particulier le rôle de la Réalité Virtuelle dans l'accompagnement par les ergonomes et les designers industriels des Concepteurs Mécaniciens dans les prises de décisions techniques.

Figure 40 : Véhicule F-City industrialisé par FAM

Afin de mettre en œuvre notre expérimentation dans le cadre du projet F-City, nous avons souhaité nous concentrer sur deux convergences spécifiques dans le processus de conception :

- Une convergence Ergonomie – Conception Mécanique, à travers l'étude du positionnement d'un système de commande (nommé Opus A3), intégrant ainsi la composante anthropométrique tout en tenant compte des contraintes techniques de développement (chap. iV §2.3.1).
- Une convergence Design Industriel – Conception Mécanique, traitant du choix d'une configuration matériaux/textures/couleurs des éléments de carrosserie, et d'intérieur du véhicule, en accord avec les préconisations esthétiques et respectant les contraintes techniques d'industrialisation (chap. iV §2.3.2).

Ces études ont servi de cadre d'utilisation de la réalité virtuelle comme outil de Formalisation Intermédiaire collaboratif, multi-métiers.

2.2. Moyens et ressources

L'équipe de conception qui est intervenue dans le cadre des études considérées a été constituée de dix membres :

- 5 ingénieurs mécaniciens,
- 2 ergonomes,
- 3 designers industriels,

Afin d'assurer les différentes tâches de conception définies, chaque acteur disposait des outils et méthodes habituellement utilisés par son corps de métier. A cela s'est ajoutée notre méthodologie globale de conception présentée dans notre troisième chapitre (page 81), ainsi que d'une plate forme de réalité virtuelle immersive de type CAVE trois écrans [CRUZ 1993]. Cette plateforme est constituée de trois écrans à stéréoscopie active (2,10m x 2,80m). Les mouvements sont captés par un système optique composé de 6 caméras et de nombreux capteurs disposés sur les bras, jambes,

tronc et tête de l'utilisateur. Des gants d'acquisition de position permettent de capter plus précisément les gestes des mains et des doigts.

2.3. Réalisations : étude de la RV comme outil d'aide à la convergence

2.3.1. Articulation Ergonomie – Conception mécanique

2.3.1.1. Problématique industrielle : Positionnement de l'Opus A3

L'étude de l'articulation ergonomie-mécanique s'est faite dans le cadre d'une étude de positionnement un écran de contrôle nommé Opus A3 Naviboard® produit par l'entreprise Nvu-log, et représenté sur la figure 41.

Figure 41 : Poste de conduite du Véhicule F-City équipé de l'Opus A3 Naviboard® et de l'Opus A5 Dashboard®

L'Opus A3 Naviboard® est un écran dédié aux informations liées à l'auto-partage, ainsi qu'à la navigation (GPS, stationnement, etc.). Il vient seconder l'opus A5 Dashboard® positionné sur le support central de commande, à droite sur la figure 41, et dédié aux informations liées à la conduite (vitesse, état de fonctionnement du véhicule, etc.).

Au cours de cette phase de prise de décision sur la disposition de l'opus A3 sur le tableau de bord, l'équipe de conception a été chargée de l'approche ergonomique tout en garantissant une faisabilité technique. Les concepteurs ont proposé puis évalué plusieurs préconcepts de positionnement de l'écran selon 7 critères prédéfinis dans le cahier des charges :

Critères de visibilité :

- C1 : Rentrer dans le cône de visibilité [directive 2000/7/CE],
- C2 : Ne pas être obstrué par le volant et la main sur le volant,
- C3 : Ne pas entrer dans le champ de vision vers l'avant [directive 77/649/CE],
- Critères d'atteinte :
- C4 : Etre atteignable avec l'index (voire le pouce et l'index pour la manipulation de la molette),
- C5 : Ne pas entrer en collision avec le commodo droit et son volume d'utilisation,

- Critère technique :
- C6 : Porte à faux minimisé
- Critère esthétique :
- C7 : S'intégrer dans le dessin général de la planche de bord

Au cours de la phase de recherche de solutions, plusieurs concepts ont été avancés par l'équipe de conception :

Dans le premier concept, l'opus A3 Naviboard® est positionné à proximité de l'opus A5 Dashboard® afin de permettre à l'utilisateur d'accéder à toutes les informations dans un espace unique où se situent aussi les commandes de conduite (figure 42 à gauche). Le deuxième concept positionne l'opus A3 Naviboard® de l'autre côté du volant, permettant ainsi d'équilibrer le poste de conduite (cf. figure 42 à droite).

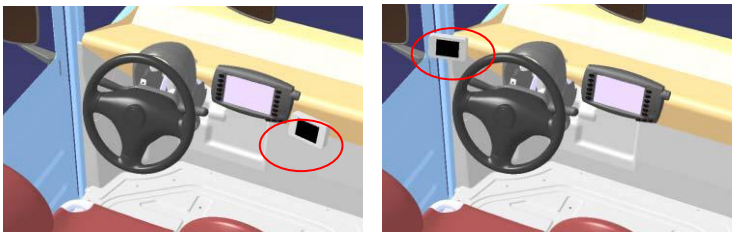


Figure 42 : F-City – Concepts de positionnement de l'Opus A3

2.3.1.2. Protocole et applications

Nous nous positionnons dans la phase de convergence vers une solution technique, entre l'Ergonome et le Concepteur Mécanicien. La Réalité Virtuelle est considérée comme un outil d'aide à la formalisation.

Une application a été développée sur plateforme de Réalité Virtuelle dans le but de confronter les différentes propositions. Cette application est basée sur le principe de faire évoluer une main virtuelle, guidée par la main réelle du concepteur, dans l'environnement intérieur du véhicule étudié (Figure 43). Le concepteur est installé sur un siège automobile placé au centre de la plateforme de réalité virtuelle. Dans cette posture simulant les contraintes posturales réelles du véhicule futur, il peut ainsi évaluer l'accessibilité des différents modules étudiés. Lorsque la main virtuelle entre en contact avec le module concerné, celui-ci change de couleur permettant ainsi un retour d'information direct et rapide. D'autre part, afin d'aider le concepteur à évaluer ses capacités d'atteinte et de vision du conducteur, les champs d'atteinte de chaque bras et le champ de vision peuvent être affichés en accord avec les normes anthropométriques [norme X35-002].

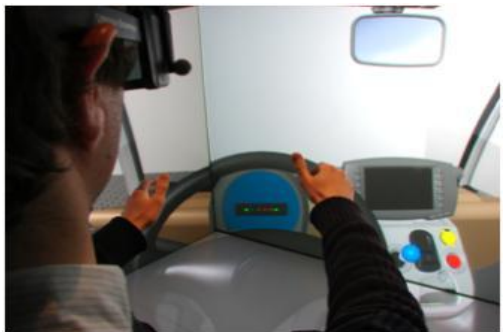


Figure 43 : Evaluation de l'accessibilité des commandes sur plateforme de RV

L'évaluation a été conduite lors d'une revue de projet où étaient présents sur la plate forme un ergonome et un concepteur mécanicien. Tout deux avaient la possibilité de partager et travailler, selon leur point de vue, sur la même représentation du concept pour converger vers une solution acceptable. Un technicien, externe au projet, assurait le passage d'une configuration à l'autre, selon la demande des deux acteurs.

2.3.1.3. Résultats et discussions

Dans le cadre de nos observations, nous notons que les critères 1 (Rentrer dans le cône de visibilité) et 3 (Ne pas entrer dans le champ de vision vers l'avant) ont été ceux qui sont revenus régulièrement en contradiction. C'est la nature même des deux critères qui semble difficilement conciliable. En effet, faire entrer un objet dans le cône de visibilité de l'utilisateur tout en l'écartant du champ de vision vers l'avant est complexe. Dans ce cadre, la réalité virtuelle aura permis une évaluation de chaque configuration proposée et ainsi, choisir la solution la meilleure (ou la moins mauvaise lorsque les compromis n'étaient pas tous satisfaisants). Le concepteur mécanicien a pu valider la solution retenue selon ses propres critères techniques (moyens de fixation, faisabilité du passage de câbles électroniques, etc.) et l'ergonome selon ses aspects d'accessibilité et de champ de vision.

Ainsi, l'équipe de conception a proposé à l'entreprise FAM de retenir le préconcept n°3 présenté sur la figure 42 à droite. Une fois ce préconcept établi, l'entreprise a formulé plusieurs propositions techniques intégrant leur capacité de production et respectant au mieux les préconisations ergonomiques et techniques de l'équipe de conception. Deux propositions supplémentaires (3.1 et 3.2) ont été avancées par l'entreprise.

Au final, l'équipe de conception a retenu le concept 3.2 car il conciliait un maximum de critères. Une seconde itération sur plateforme de réalité virtuelle a permis à l'équipe de conception de simuler et d'évaluer ce nouveau concept selon les critères évoqués et de le confronter selon différents angles de vue une nouvelle fois en situation virtuelle. La figure 44 présente la solution finale retenue et installé sur le véhicule F-City.

Figure 44 : Industrialisation du concept N°5

2.3.1.4. *Apports de la Réalité Virtuelle en convergence Ergonomie – Conception Mécanique*

Dans le cadre d'une convergence Ergonomie-Conception Mécanique durant la phase de développement technique (troisième phase), la réalité virtuelle apporte un soutien à l'évaluation et à la simulation multi-métier et en convergence.

La **flexibilité du modèle 3D et des interactions** sur la plateforme, permettent de mettre le concepteur en position d'expert, tout en faisant varier des données physiologiques (taille, mobilité, etc.). Ainsi, les concepteurs ont pu prendre en compte durant la phase de convergence technique, la composante humaine pour mieux appréhender le produit conçu (flexibilité dans la simulation de l'activité).

D'autre part, la réalité virtuelle aura permis **d'approcher des évaluations subjectives complexes** faisant rentrer en ligne de compte plusieurs critères incompatibles par l'intermédiaire de critères subjectifs. En effet, alors que l'aspect normatif est un volet quantifié de l'ergonomie, relativement facile à prendre en compte par le concepteur mécanicien (hauteur idéale d'activité, champ de vision, etc.), il y a de nombreux autres volets beaucoup plus subjectifs tels que les aspects psychologiques ou organisationnels. Par exemple, le ressenti de l'utilisateur est difficilement transcriptible, et de fait, difficilement intégrable par le concepteur mécanicien. Il est donc nécessaire que l'ergonome puisse traduire ce qu'est un « bon ressenti » par des dimensions, une architecture, etc. La réalité Virtuelle a permis de simuler l'activité future souhaitable de l'utilisateur [SAGO 2003]. Ainsi, l'ergonome a pu évaluer cette situation, et le ressenti probable de l'utilisateur. Ainsi, les différents choix subjectifs ont permis de réaliser des compromis avec les notions techniques, afin d'intégrer au mieux les besoins d'usage.

2.3.2. Articulation Design Industriel – Conception mécanique

2.3.2.1. Problématique industrielle : Choix d'une configuration textures/couleurs/matériaux

Le sujet d'étude de l'articulation design industriel – conception mécanique a été le choix de la configuration texture/couleur du véhicule F-City suivant plusieurs éléments de tendance. Les éléments concernés par ce choix étaient l'ensemble des carrosseries externes du véhicule, ainsi que l'équipement intérieur : tableau de bord, siège et doublures intérieures.

En accord avec les consignes de positionnement marketing annoncées par l'entreprise porteuse du projet, les designers industriels ont travaillé au préalable sur des tendances de produits et sur l'environnement d'utilisation ainsi que sur la cible client. Ces recherches de solutions les ont conduits à proposer plusieurs univers graphiques, formalisés par des planches produits et des planches de tendance ainsi que des roughs et croquis (cf. figure 45).

Figure 45 : Proposition de configuration texture/couleur par les designers industriels

Afin d'opérer un choix des solutions retenues, et dans le but de converger avec les notions techniques du produit, une application de configuration textures/couleurs/matériaux a été développée.

2.3.2.2. Protocole et applications

Un configurateur textures/couleurs/matériaux a été développé pour cette expérimentation. Il est présenté sur les figures 46. Son objet est de permettre au designer industriel et au concepteur mécanicien d'interagir en temps réel avec le véhicule, en modifiant les textures, couleurs et matériaux des différents ensembles composant le véhicule (carrosserie, montant de baies, enjoliveurs, pare-chocs, sièges, tableau de bord). Le configurateur est constitué d'une tablette PC tactile, et d'un programme réalisé sur Virtools, qui interagit en temps réel avec le modèle 3D projeté sur la plateforme de Réalité Virtuelle.

Le principe est de piloter à partir d'une même interface présentée sur la figure 46, les couleurs, textures et matériaux de chaque ensemble. L'application permet à l'utilisateur de faire évoluer les couleurs selon un réglage continue de Cyan, Magenta, Jaune et Noir (CMJN), et de réaliser un aperçu indépendamment des choix intérieurs et extérieurs, afin d'évaluer les différentes options d'assortiment, mais aussi de sélectionner des matériaux et de visualiser leurs rendus sur la plateforme de réalité virtuelle.

Cette application permet aussi de manipuler directement à partir de la tablette PC le véhicule virtuel dans l'espace et de simuler la mise en marche de ses systèmes d'éclairage et d'ouverture des parties mobiles. Enfin, il est possible à tout moment d'exporter la configuration choisie en termes de couleur et de texture, via une sauvegarde globale. Les données exportées sont les caractéristiques CMJN chiffrées de chacun des ensembles ainsi que des enregitrements images de différents points de vue de la voiture.

Figure 46 : Configurateur textures/couleurs/matériaux en Réalité Virtuelle

2.3.2.3. *Résultats et discussions*

Suite aux propositions de tendance réalisées par le designer industriel, une revue de projet sur la plateforme de réalité virtuelle a été organisée afin de trouver la configuration répondant au mieux à ces propositions.

Dans un premier temps, le designer industriel a configuré le véhicule en accord avec ses planches de tendance. Puis dans le cadre de discussions argumentées, le concepteur mécanicien s'est approprié les propositions du designer industriel, et a proposé à son tour une configuration la plus proche possible de celle proposée.

Par exemple, le designer industriel avait proposé pour les sièges, un tissu maillé large, d'une couleur marron (CMJN : 20 – 35 – 50 – 0). En réponse à cette proposition, le concepteur mécanicien a

proposé un tissu référencé Sattler 804 K73 (CMJN : 18.8 – 36.9 – 56.2 – 0). La figure 47 présente une visualisation comparative de deux configurations de couleurs des sièges.

D'autres cas ont été plus difficiles à résoudre, notamment sur les éléments mécaniques, comme les montants de baies par exemple. Alors que le designer industriel demandait un matériau naturel, gris clair (CMJN : 8 – 6 – 6 – 0), lisse et brillant, le concepteur mécanicien n'a pas eu d'autre choix que de proposer un matériau plus sombre (de l'acier 22MnB5, CMJN : 58.1 – 43.5 – 41.9 – 7.1), ou de recouvrir ce matériau d'une peinture claire. Suite à des discussions, le concepteur mécanicien a maintenu sa proposition de matériau plus sombre. En effet, grace à la flexibilité de l'interface, le designer industriel a pu visualiser en temps réel la proposition du concepteur mécanicien et confirmer qu'elle pouvait être satisfaisante sur un plan esthétique.

Figure 47 : visualisation comparative de plusieurs configurations de couleurs des sièges du véhicule F-City

La configuration texture/couleur sur plateforme a permis à l'équipe de conception d'abourtir à plusieurs choix de coloris en accord avec les univers de tendance définis, et de les soumettre à l'entreprise porteuse du projet afin qu'elle puisse valider la configuration retenue.

2.3.2.4. Apports de la Réalité Virtuelle en convergence Design Industriel – Conception Mécanique

Selon le designer industriel, les rendus réalistes de la Réalité Virtuelle ne permettent pas une évaluation concrète des futures configurations (contrairement à des logiciels spécialisés tels que 3D Studio Max par exemple). Pour autant, un des atouts de la Réalité Virtuelle réside dans son **aspect immersif** et en particulier la **notion d'échelle 1**, très appréciée par le designer industriel. Ces deux aspects sont généralement atteints par le designer industriel lors d'une phase de prototypage généralement très coûteuse.

D'autre part, la **réactivité du système** a aussi permis de mettre en œuvre, d'expérimenter et d'enregistrer plusieurs configurations choisies sans contraindre les deux acteurs dans leur discussion.

Enfin, ce support de Formalisation Intermédiaire 3D a pour atout de rendre la représentation 3D **interprétable par plusieurs métiers de manière simultanée**, et donc de faire discuter plusieurs métiers autour de problématiques différentes tout en facilitant une convergence vers un objectif commun. En effet, la flexibilité de l'outil a permis de passer très rapidement d'un mode à l'autre. Les concepteurs ont ainsi pu apporter leur expertise dans une activité collaborative sans pour autant devoir abandonner leurs habitudes et leurs outils habituels.

2.4. Conclusions

Dans le cadre de cette étude et pour la phase de développement technique, nous avons pu mettre en évidence l'intérêt de la réalité virtuelle dans les articulations Ergonomie – Conception Mécanique ainsi que Design Industriel – Conception Mécanique. Nous avons pu voir que cette technologie constituait un outil supplémentaire d'aide à la convergence entre des métiers différents. En effet, au-delà du traitement de données numériques, très importantes pour le concepteur mécanicien, la réalité virtuelle permet à plusieurs concepteurs de se retrouver ensemble dans un espace de conception, d'évaluation et de validation autour d'une même formalisation, mixte, qui améliore la convergence.

Ainsi, les notions d'atteintes, mais aussi de perception, peuvent être évaluées. De plus, la réactivité du système et l'aspect Temps Réel, permettent des modifications mineures (déplacement d'un objet, modification d'un paramètre prédéfini), laissant ainsi à l'équipe de conception une possibilité de faire varier plusieurs concepts, voire même de se laisser un degré de liberté durant la revue de projet.

La réalité virtuelle devient alors un outil propre de conception, même si la liberté d'action reste réduite à une anticipation des variations de paramètres. Ces variations peuvent avoir lieu au niveau du produit, mais aussi au niveau de l'utilisateur. En effet, il est possible de modifier artificiellement la taille de l'utilisateur, afin de simuler une vue pour une femme petite (5^{e} percentile), puis pour un homme grand (95^{e} percentile), afin de valider les configurations extrêmes acceptées.

Enfin, il est possible, à partir de la plateforme de réalité virtuelle, de visualiser simultanément plusieurs concepts, de les comparer, et de valider des choix de conception, via un export de valeurs des paramètres par exemple.

Ainsi, nous positionnons la Réalité Virtuelle comme une véritable plateforme de convergence multi-métier dont le but sera d'ajouter à tous les moyens de Formalisations Intermédiaires de conception existant, des Formalisations mixtes et des méthodes. Ainsi, les équipes de conception pourront réaliser dans de meilleures conditions les phases de convergence multidisciplinaire. Ce nouveau contexte d'articulation Ergonomie – Design Industriel – Conception Mécanique, représenté sur la figure 48 consiste à considérer les relations actuelles existantes, rendues difficiles par les différences de méthodes et outils mais aussi de culture et de vocabulaire, et d'y ajouter un moyen complémentaire de collaboration grâce à la réalité virtuelle.

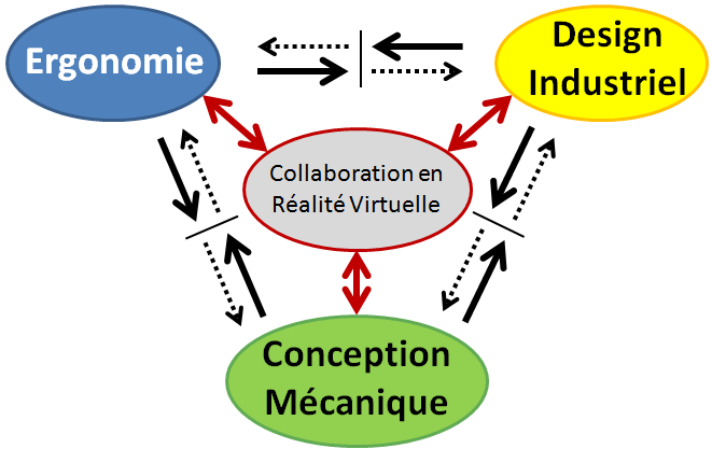


Figure 48 : La Réalité Virtuelle comme outil support des Formalisations Intermédiaires

Les deux études conduites, visant à positionner la Réalité Virtuelle comme un support de formalisation intermédiaire, nous ont permis de mettre en évidence sa pertinence dans le cadre des deux convergences multidisciplinaires étudiées. Nous validons donc localement cette hypothèse d'étude 2a.

3. Expérience 2B : Etude des convergences Design Industriel – Conception Mécanique en Réalité Virtuelle

3.1. Objectifs et contexte

Cette deuxième expérience se propose d'étudier et de valider la pertinence de la Réalité Virtuelle durant les différentes convergences du processus de conception, intervenant entre deux métiers : le Design Industriel et la Conception Mécanique. L'hypothèse de notre étude est la suivante :

Hypothèse 2b de l'étude : La Réalité Virtuelle est un support de Formalisations Intermédiaires permettant de faciliter les phases de convergence entre les métiers de Designer Industriel et de Concepteur Mécanicien.

Afin de réaliser notre étude, nous nous appuyons sur un projet de conception d'un banc de test de cartes électroniques. Répondant à chaque demande de ses clients de manière personnalisée, l'entreprise A qui développe ces produits propose un principe unique de «cloche» qui permet de tester une carte électronique (cf. figure 49). Dernièrement, plusieurs de ses clients se sont plaints de problèmes de postures contraignantes et d'efforts excessifs dus entre autre à la cloche.

C'est dans le cadre du renouvellement de son concept de banc de test de cartes électroniques que l'entreprise A nous a sollicité pour repenser le système en accord avec son usage, tout en apportant une touche esthétique supplémentaire lui permettant d'atteindre d'autres marchés, et en garantissant une faisabilité technique.

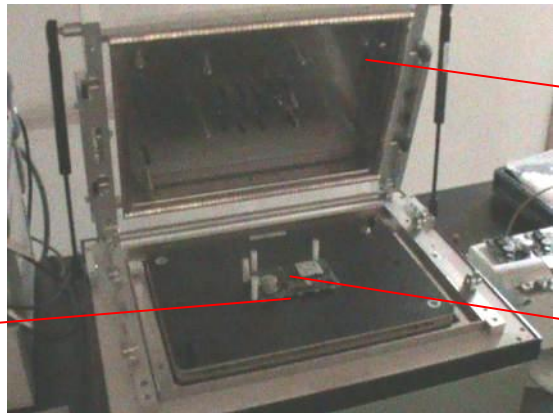


Figure 49 : Banc de test de cartes électronique commercialisé par l'entreprise A

3.2. Moyens, ressources et protocole

L'équipe de conception intervenue dans le cadre de ce projet était constituée d'un concepteur mécanicien, d'un designer industriel et d'un ergonome. Tout trois ont été tout au long du projet, en lien étroit avec l'entreprise A afin de garantir un respect des attentes et des besoins des clients. Même si le projet portait sur l'intégration de l'Ergonomie et du Design Industriel par le Concepteur Mécanicien, nous n'étudierons que les questions propres à la convergence Design Industriel – Conception Mécanique (DI-CM). Certains éléments relatifs aux activités de l'Ergonome sont néanmoins rapportés afin de maintenir le contexte du projet.

L'équipe de conception disposait de notre méthodologique globale de conception, présentée dans le chapitre III, page 81, ainsi que d'un set d'outils et de méthodes habituellement utilisés dans le cadre de leur activité. De plus, la plateforme de réalité virtuelle, ainsi qu'un ingénieur en informatique en support technique étaient à disposition.

Des revues de projet ont été planifiées tous les quinze jours afin d'assurer un suivi régulier de l'avancée du projet. Entre ces revues de projet, différents points techniques ont pu être traités.

Toutes ces réunions ont été filmées et ont donné lieu à des entretiens avec les acteurs tout au long du projet.

3.3. Réalisation : Etude des convergences Design Industriel – Conception Mécanique assistées par la RV

Afin de mettre en évidence le rôle de la réalité virtuelle dans les différentes phases de convergence, nous présentons cette partie selon les quatre phases du processus de conception : étude et analyse des besoins, recherche de solutions, développement de la solution et validation.

3.3.1. Phase 1 : Etude et analyse des besoins

Dans un premier temps, une première visite de l'équipe de conception dans les locaux de l'entreprise A et une présentation des produits a permis à l'ergonome et au designer industriel d'évaluer la situation existante ainsi que l'environnement de travail des opérateurs. L'ergonome a pu analyser l'activité et réaliser un premier diagnostic (cf. figure 50). Il en ressort par exemple que certains paramètres posent problème et nécessitent une intervention et une modification de l'activité. C'est le cas notamment pour la sécurité des opérateurs, l'exigence mentale de la tâche, les postures de travail, les commandes, ainsi que l'implantation du poste.

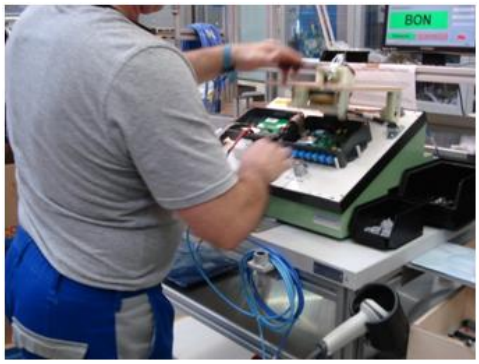


Figure 50 : Analyse de l'activité sur le poste de test de carte électronique de l'entreprise A

De son côté le designer industriel a pu, suite à plusieurs entretiens avec les représentants de l'entreprise, établir un ensemble de mots clés visant à cadrer la demande et à établir l'univers souhaité pour le produit. Parmi ces mots peuvent être cités : « modulable », « évolutif », « qualité », « atypique », « fonctionnel ». Sur la base de cet univers sémantique, le designer industriel a formalisé différents univers graphiques sous forme de planche de tendances et d'univers produit, comme on peut le voir sur la figure 51.

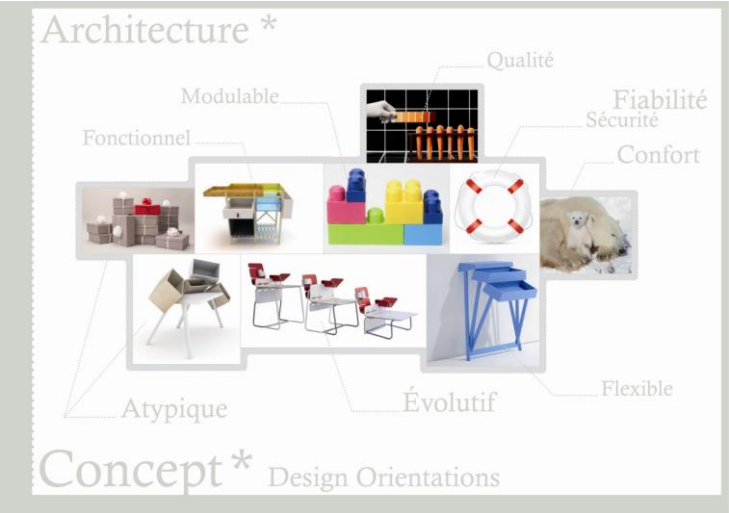


Figure 51 : Planche de tendances et d'univers produit

Enfin, lors de cette première phase d'analyse du besoin, le concepteur mécanicien a été chargé de la rédaction du cahier des charges conceptuel. Cette étape s'est traduite par une centralisation des éléments apportés par l'ergonome et le designer industriel et leur traduction en paramètres de conception. L'idée était de comprendre sur quels éléments du produit final, les spécifications allaient agir. Par exemple, les spécifications de confort apportées par l'Ergonome impacteront les dimensions et l'accessibilité.

Sur la première phase du processus, la réalité virtuelle n'a pas été utilisée. Les phases de convergence DI-CM ont été conduites avec les propres outils de chacun des acteurs.

3.3.2. Phase 2 : Recherche de solutions

En étape préliminaire de la recherche de solution, le Concepteur Mécanicien approfondi la définition du problème en réalisant une analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE. Les fonctions établies sont accompagnées de critères dont les valeurs coïncident en particulier avec les recommandations ergonomiques. Par exemple :

- « Fonction FP1 : Permettre à l'opérateur d'effectuer un test de contrôle d'un produit en toute sécurité »,
- « Critère d'anthropométrie : le poste doit être adaptable aux différentes tailles d'opérateurs, allant de F05 (153cm) à H95 (189cm) ».

D'autres fonctions, plus techniques, sont accompagnées de critères dont les valeurs sont issues du contexte technique d'utilisation du produit, par exemple :

- « Fonction FC3 : Utiliser les énergies disponibles »,
- « Critère d'énergie pneumatique : le produit doit pouvoir être alimenté par une énergie pneumatique de 5 à 8 bars ».

L'objectif de ce cahier des charges fonctionnel est de cadrer et de préparer le traitement des solutions apportées lors de la phase de recherches créatives menée parallèlement par l'ergonome et le designer industriel.

Lors de cette étape de recherche, ces deux concepteurs ont formalisé un ensemble de propositions partielles ou totales, le concepteur mécanicien les ayant rejoint plus tard dans le projet. Le designer industriel a réalisé dans un premier temps une étude structurelle puis formelle, en esquissant en particulier l'architecture du produit futur, ainsi que ses premiers traits. En parallèle, l'ergonome a proposé différentes fonctionnalités permettant de répondre aux besoins d'usage.

En ce qui concerne le concepteur mécanicien, une fois l'étude fonctionnelle réalisée, il a réalisé un approfondissement fonctionnel afin d'apporter des solutions techniques via la méthode Function Analysis System Technique [KAUF 2009].

Par la suite, l'ensemble des propositions ont été centralisées par le mécanicien afin de formaliser cinq avant-projets sur le logiciel CAO CATIA V5 afin de réaliser une étude produit/process entre autre. Ces formalisations, constituées globalement de sous-ensembles simples et statiques, ont été présentées sur la plateforme de réalité virtuelle afin de les mettre à l'épreuve dans le cadre d'une simulation de l'activité.

Dans cette première évaluation, c'est en particulier l'ergonome qui a pu évaluer le respect des recommandations ergonomiques établies dans le cahier des charges notamment sur un plan fonctionnel. De son côté, le designer industriel, aidé de ses croquis et planche de présentation produit, tels que présentés sur la figure 52, s'est surtout intéressé à la perception des grandeurs et des rapports, projetant ainsi ses croquis à plus grande échelle.

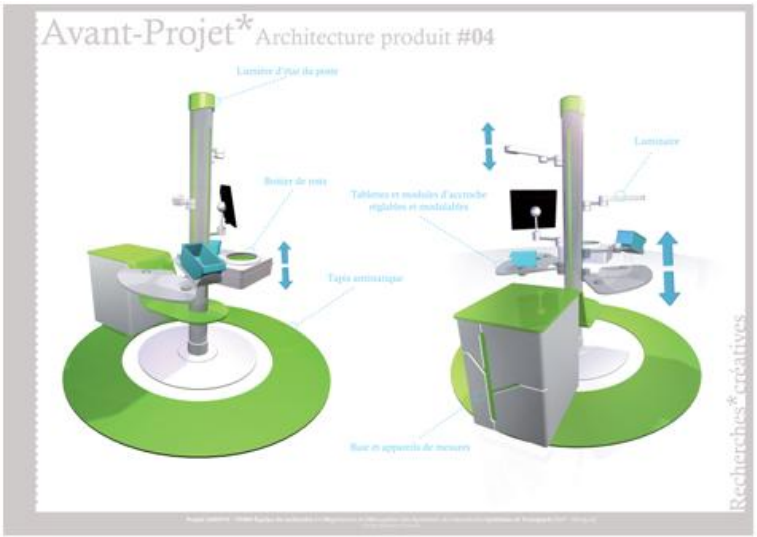


Figure 52 : Planche de présentation produit

Véritable support de discussions multidisciplinaires, la plateforme de réalité virtuelle a permis au concepteur mécanicien de prendre part aux discussions relatives aux convergences vers ces avant-projets, afin de prendre en compte le plus tôt possible les impératifs liés à l'ergonomie et au design du produit. La figure 53 présente une revue de projet sur la plateforme de réalité virtuelle lors de la phase d'évaluation des avant-projets.

Figure 53 : Revue de projet lors de la phase d'évaluation des avant-projets

Dans cette phase, la Réalité virtuelle a permis de prendre en compte les premiers aspects de la convergence DI-CM, et notamment l'aspect architectural du produit. Cette architecture s'est traduite par une capacité à ajouter ou enlever des composants du modèle (rangements, plateaux, etc.) mais aussi de modifier des éléments géométriques tels que les hauteurs de travail. Au cours de cette phase et de l'utilisation de la Réalité Virtuelle, les aspects fonctionnels et structurels du produit ont été précisés. La Réalité Virtuelle a en particulier aidé à mettre en valeur les Formalisations de chacun des métiers et a servi de support à des discussions interdisciplinaires. En effet, avant la revue de projet, chaque acteur disposait de ses formalisations. Chacune d'entre elles ont été modélisées par le concepteur mécanicien, et ont été présentées sur la plateforme de réalité virtuelle.

3.3.3. Phase 3 : Développement de la solution

Une fois l'évaluation d'avant-projets réalisée, l'entreprise, avec l'expertise de l'équipe de conception, a choisi de valider à l'aide de la Réalité Virtuelle, une des solutions conceptuelle et a permis à l'équipe de poursuivre ses travaux de développement. Cette phase est celle qui a connu le plus de convergences. Tous les aspects du produit ont pu être modifiés, améliorés, afin de répondre au mieux aux besoins des clients tout en assurant la fabricabilité du produit. En accord avec Gomes [GOME 2002], nous avons choisi de définir le produit conçu comme composé de cinq types d'aspects : les aspects Dynamiques, Fonctionnels, Géométriques, Physiques et Structurels.

Plusieurs cas de convergence peuvent être pris pour exemple. Certains touchent les aspects structurels du produit. La nécessité de l'intégration d'éléments électriques par le concepteur mécanicien a impliqué que le designer industriel ajoute un élément de cartérisation afin de les protéger mais aussi de les cacher. Ce carter supplémentaire a impliqué différentes contraintes géométriques et d'assemblage qui ont pu être étudiées notamment grâce à la réalité virtuelle.

Dans d'autres cas, les aspects dynamiques ont donné lieu à des discussions afin d'atteindre une solution acceptable pour chacun : le système d'ouverture/fermeture du produit initial était problématique car source de problème de sécurité. Les solutions proposées de fermeture notamment, ont nécessité des explications poussées des mécanismes de la part du Concepteur Mécanicien. En effet, le designer industriel et l'ergonome ont proposé des mécanismes « idéaux », c'est-à-dire qu'ils n'ont pas considéré les contraintes techniques de dynamique ou de fabrication. Il était donc indispensable que le concepteur mécanicien comprenne bien toutes les variables à prendre en compte afin de proposer une solution technique viable et acceptable (exemples de variables étaient : course totale de la cloche, mode de verrouillage, efforts maximum à fournir, précision de mise en position, etc.). Pour cela, les formalisations ont été présentées sur la plateforme collaborative de réalité virtuelle afin de favoriser les échanges et de limiter les itérations.

Les aspects géométriques ont eux aussi demandé beaucoup d'attention et ont fait l'objet de multiples itérations. En effet, la procédure de validation d'une forme passait d'une forme idéale dessinée par le designer industriel, à une forme modélisée et optimisée via un calcul de structure par le concepteur mécanicien. Dans certains cas, tels que la validation de la géométrie des pieds du produit, quatre à cinq itérations ont été nécessaires. Toutes n'ont pas été réalisées sur plateforme de réalité virtuelle, mais souvent sur simple écran d'ordinateur, à l'aide du logiciel CATIA V5, plus facile et rapide d'utilisation.

Enfin, les aspects physiques ont été les derniers aspects figés. En effet, l'utilisation et la conception du produit ont fait qu'une modification des matériaux était encore possible en fin de processus. Ainsi, une possibilité de passer d'un matériau type Alu ou Inox, à un matériau polymère était encore possible lors de la validation avancée du produit. Néanmoins, il a été nécessaire de verrouiller cet aspect afin d'engager les process de fabrication, en découpe laser et usinage, ou en moulage et thermoformage. Dans ce contexte, le concepteur mécanicien, avec l'aide du designer industriel en particulier, a défini les matériaux et les process associés, afin de satisfaire les consignes géométriques en termes de qualité de coupe et d'usinage, de coûts de production et de satisfaction pour l'opérateur. Lors de cette définition, la Réalité Virtuelle n'a pas été utilisée hormis pour une validation globale du concept une fois que tous les aspects ont été figés.

3.3.4. Phase 4 : Validation

La configuration même du projet observé, avec une phase 3 extrêmement suivie en termes d'itération et d'intégration de l'ergonomie et du design industriel, a considérablement réduit la phase 4 de validation de la solution. En effet, cette validation a résidé dans une check-list générale ainsi que la mise à l'épreuve du produit en Réalité Virtuelle par un utilisateur. Cette mise à l'épreuve a joué un rôle sur la validation des composantes ergonomiques. En ce qui concerne le design industriel, les planches de présentation de la solution développée, ainsi que les rendus réalistes réalisés par des outils conventionnels, ont permis cette validation. En termes de convergence, la Réalité Virtuelle a donc eu un rôle assez restreint dans cette phase 4.

3.4. Conclusions

L'étude des phases de convergence nous ont permis de mettre en évidence l'intérêt de la Réalité Virtuelle dans certaines phases de convergence (phase 2 et phase 3). Les atouts que présente cette technologie résident essentiellement dans sa flexibilité d'utilisation. Néanmoins, nous avons pu voir qu'elle n'était pas systématiquement la plus indiquée pour faciliter les convergences Design Industriel – Conception Mécanique. Cela remet en cause notre hypothèse de l'utilisation systématique de la Réalité Virtuelle tout au long du processus de conception. La question que nous nous posons ainsi est de savoir comment structurer l'utilisation de la Réalité Virtuelle dans le processus de conception. En effet, si cette technologie semble extrêmement pertinente lors de projet de conception collaborative, il devient nécessaire de cartographier son contexte d'utilisation.

3.4.1. Validations successives des aspects du produit

Nous avons pu observer que durant un projet de conception, chaque concepteur axait son activité sur certains des aspects évoqués (Dynamiques, Fonctionnels, Géométriques, Physiques et Structurels), et favorisait certains aspects pour ses recherches de solutions.

Ainsi, nous avons pu voir que les aspects Fonctionnels étaient validés tôt dans le processus, dès la phase de définition du cahier des charges. Dès lors, une première convergence apparait, à savoir les fonctions à intégrer dans le produit, permettant une satisfaction à la fois de l'usage, mais aussi des composantes techniques imposées par le contexte industriel, ainsi que des attentes en termes d'esthétique par exemple.

Par la suite, les aspects Structurels ont été au centre de l'attention des concepteurs. En effet, le designer industriel apprécie de travailler sur l'aspect structurel avant de donner des formes. Dans un premier temps, il manipule des « boîtes » ou des « sous-ensembles élémentaires » sans connaître ni leur forme, ni leur matière. Les seules informations disponibles à ce moment là sont les fonctionnalités de chaque sous-ensemble, ainsi que les liaisons possibles entre les sous-ensembles.

Dans un troisième temps, les aspects Géométriques et Dynamiques sont traités. La Géométrie est d'abord traitée par le designer industriel, alors que la Dynamique est traitée par le concepteur mécanicien. Tous deux réalisent alors une convergence entre ces deux aspects, convergence qui est souvent sources de problèmes car une modification de géométrie impacte des aspects dynamiques et vice-versa.

Enfin, dans le cadre du projet observé, les aspects Physiques ont été traités en fin du processus de conception, par le concepteur mécanicien.

Bien entendu, ces différents aspects n'ont pas été figés totalement et dans un même temps, mais ont fait l'objet de validations partielles après plusieurs itérations successives. La figure 54 indique le niveau de validation de chacun de ces aspects (en ordonnées) selon les phases du processus de conception, et met clairement en évidence ces écarts d'évolution. Cette figure met en particulier en évidence l'impact des phases 2 et 3 sur le produit conçu, phases durant lesquelles l'essentiel de ses aspects sont définis et validés. Le rôle de la Réalité Virtuelle durant ces deux phases n'en est que plus important car elle contribue à ces validations successives.

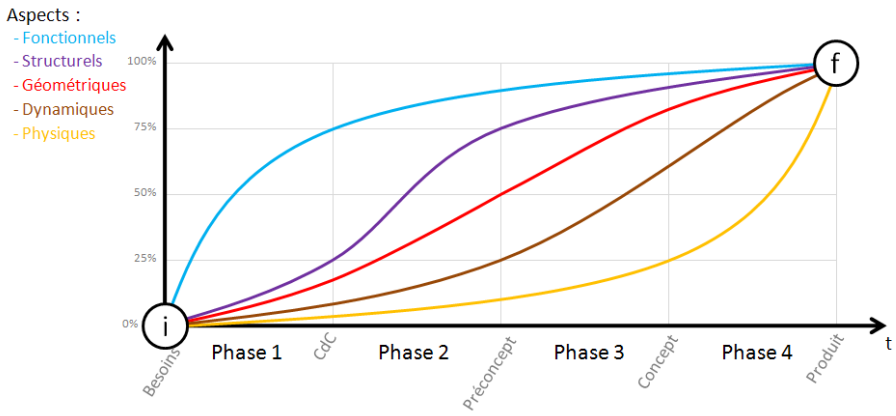


Figure 54 : Evolution du niveau de validations partielles de chacun des aspects du produit conçu, selon les phases du processus de conception

3.4.2. Choix de la technologie adaptée à l'application à développer

Nous avons abordé la notion itération durant plusieurs cas de convergence. Nous avons aussi mis en évidence le fait que certaines de ces itérations étaient réalisées sur la plateforme de réalité virtuelle, mais pas toutes. Nous souhaitons souligner le fait que le choix de la réalité virtuelle comme technologie support de convergence, n'est pas systématique. Ainsi, nous validons partiellement l'hypothèse d'étude 2b : la Réalité Virtuelle ne peut être employée pour toutes les phases de convergence. Son utilisation dépend du contexte de convergence.

Dans certains cas, lors d'itérations mineures, concernant les modifications géométriques notamment, des outils demandant moins de développement technique peuvent suffire. Le tout est de définir ce que l'on souhaite observer et surtout qui souhaite évaluer un aspect du produit, ainsi que les outils qu'il utilise habituellement.

Dans le cas de l'évaluation d'une modification géométrique entre le designer industriel et le concepteur mécanicien, une visualisation de la modélisation sur un logiciel CAO standard peut largement suffire. A l'inverse, dans le cas de la validation des aspects fonctionnels par des utilisateurs, il est nécessaire de pouvoir simuler l'activité et donc de disposer d'un outil immersif, tel que la réalité virtuelle.

Lors de phases intermédiaires, nous pouvons définir une itération moyenne où seuls les concepteurs se retrouvent autour d'un modèle 3D permettant une visualisation et une manipulation collaborative.

Ainsi, nous pouvons formaliser, tel que la figure 55 le montre, trois types d'itérations :

- les itérations mineures, ou ajustement techniques
- les itérations moyennes, ou évolution conceptuelle
- et les itérations majeures, ou remise en cause du système

Chacune de ces itérations pourra toucher chacun des aspects du produit, mais elles se dérouleront dans des conditions contrôlées par l'équipe de conception et plus particulièrement par le chef de projet.

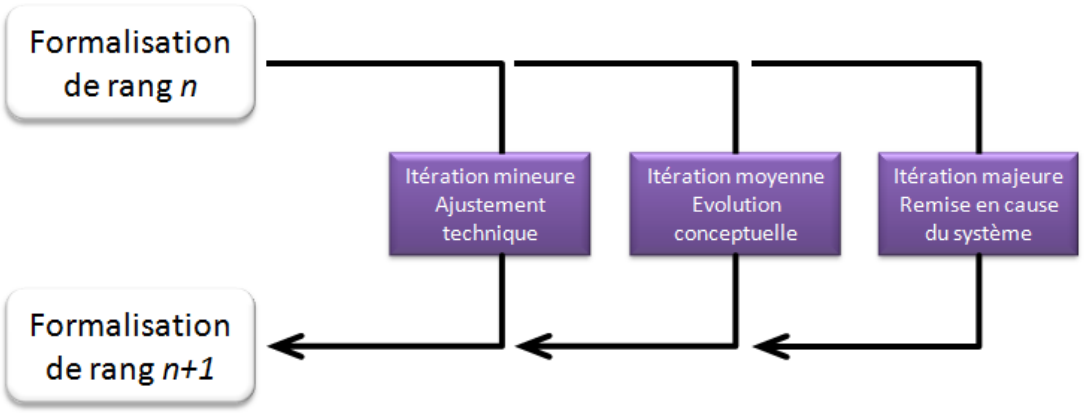


Figure 55 : Différents types d'itérations dans un processus de convergence

4. Conclusions et discussions

4.1. La RV comme support des Formalisations Intermédiaires en phase de convergence

Selon la définition donnée par Jeantet [JEAN 1995], une Formalisation Intermédiaire doit permettre une meilleure communication entre les acteurs de la conception, pour permettre d'atteindre plus rapidement une solution acceptable pour tous.

> La Réalité Virtuelle amplifie le pouvoir de communication des Formalisations Intermédiaires dans certains contextes de convergence. Dans ce sens, nous définissons donc la Réalité Virtuelle comme un support extrêmement performant de Formalisations en phase de convergence Design Industriel – Conception Mécanique. Néanmoins, son usage ne doit pas être systématique, mais ciblés sur différentes configurations de convergence. Ce qui confirme la validation partielle de notre deuxième hypothèse de recherche.

Au delà de cette définition, nous insistons sur le fait qu'à la différence des Formalisations Propres à chaque métier, la Réalité Virtuelle tend à rendre les Formalisations universelles, ou Mixtes (cf. §5.1.2. page 80), c'est-à-dire que son usage ne dépend pas du concepteur qui l'utilise. Au contraire, c'est selon l'expertise du concepteur et ses besoins en termes d'interface, que les applications RV sont développées. En témoignent les travaux de recherche de Bennes [BENN 2012] sur les méthodologies de conception d'interface RV ou ceux de Kadri [KADR 2004] sur l'utilisation de la Réalité Virtuelle comme outil collaboratif d'évaluation des concepts.

Bien entendu, la RV ne remplace pas les outils de chacun des experts, mais elle vient les compléter et devient une plateforme centrale permettant une meilleure communication entre les concepteurs, et une co-conception en temps réel.

4.2. Vers une méthodologie de convergence

Comme nous l'avons observé et en accord avec la littérature, la Réalité Virtuelle est pertinente afin de satisfaire les besoins de conception collaborative, mais il n'existe pas ou peu, pour autant, de méthodologies adaptées à cette nouvelle approche. En effet, la réalité virtuelle est souvent considérée comme un maillon d'une chaine de conception, comme cela peut être le cas dans la méthodologie présentée par Sagot [SAGO 1999]. Pourtant, nous avons souligné le besoin de support méthodologique, et plus particulièrement les manques dans les phases de convergences multidisciplinaires.

L'idée pour la suite de nos travaux est donc de généraliser notre approche et de proposer une nouvelle méthodologie de convergence multidisciplinaire assistée par les Formalisations Intermédiaires et supportée en particulier par les technologies de réalité virtuelle. En effet, les convergences peuvent s'appuyer sur des Formalisations Intermédiaires, mais celles-ci ne sont pas toujours adaptées à une utilisation collaborative. De plus, elles jouent un rôle différent en fonction des phases du processus, du type de convergence étudié et des métiers concernés.

Nous pensons qu'un support méthodologique est indispensable à la structuration des processus de convergence multidisciplinaire, et permettrait entre autre de préciser les outils et méthodes disponibles ainsi que leurs intérêts dans les différents types de convergences. Ainsi, nous souhaitons répondre notamment à la question évoquée dans le §3.4 page 106 : comment structurer l'utilisation de la Réalité Virtuelle dans le processus de conception ? Cette question se veut étendue à l'ensemble des supports de Formalisation Intermédiaires.

De ce fait, nous proposons pour contribution, une généralisation de nos travaux à une approche méthodologique des convergences multidisciplinaires (et en particulier celles concernant l'Ergonomie, le Design Industriel et la Conception Mécanique).

CHAPITRE 5 : CONTRIBUTIONS DES TRAVAUX DE THESE: APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA CONVERGENCE MULTIDISCIPLINAIRE

1. Introduction

Ce cinquième chapitre propose de généraliser nos résultats aux processus de convergence multidisciplinaire en conception de produits mécaniques. En effet, c'est lors des convergences que les discussions les plus complexes apparaissent, puisque chaque acteur doit argumenter ses choix, et dans certains cas, faire des compromis. Aussi, nous proposons pour contribution, une nouvelle approche méthodologique des convergences multidisciplinaires, appuyée par des méthodes et des outils spécifiques assistés notamment par la Réalité Virtuelle.

Après avoir précisé les objectifs de notre contribution dans une **deuxième partie**, nous précisons le cadre méthodologique dans une **troisième partie**, puis nous présentons une nouvelle méthodologie de convergence sur la base d'un modèle générique applicable dans un contexte de conception de produits mécaniques.

Enfin, dans une **quatrième partie**, nous présentons différents outils et méthodes développés dans le cadre des convergences Design Industriel – Conception Mécanique, notamment assistés de technologies telles que la Réalité Virtuelle.

Dans une **dernière partie**, nous conclurons sur ce cinquième chapitre, et nous ouvrirons différents axes de discussions réalisées dans le chapitre suivant.

2. Problématique et objectifs

Les objectifs de ce chapitre sont de proposer un nouveau cadre méthodologique pour les phases de convergence multidisciplinaire Ergonomie – Conception Mécanique – Design Industriel. En effet, les expérimentations précédentes (cf. chapitre 3 et 4) ont montré les difficultés que présentent les phases de convergence, et ce malgré l'existence d'outils collaboratifs supportant les Formalisations intermédiaires, tels que la réalité virtuelle. Il est question, dans le cadre de notre contribution méthodologique, de proposer un support d'aide à la convergence multidisciplinaire basé sur des outils de Formalisation Intermédiaire, tels que la réalité virtuelle. Pour cela, cette méthodologie devra répondre à un certain nombre d'impératifs :

- Obj1. S'adapter à différents types de convergence, c'est-à-dire que la méthodologie proposée doit rester applicable durant les différentes phases d'un projet de conception. Dans un premier temps, nous appliquons cette méthodologie aux convergences entre les métiers d'ergonome, de designer industriel et de concepteur mécanicien.
- Obj2. Permettre à chacun des métiers d'interagir avec l'objet conçu au travers des Formalisations Intermédiaires, en conservant leurs propres approches et les méthodes et

outils associés. Cela passe par le développement d'outils nouveaux et spécifiques, adaptés à ces approches multidisciplinaires.

- Obj3. Développer des outils pour le concepteur mécanicien, afin de lui permettre de garantir une bonne convergence.
- Obj4. Exploiter l'ensemble des Formalisations Intermédiaires de chaque métier comme support supplémentaire d'aide à la convergence.

3. Méthodologie de convergence multidisciplinaire

3.1. Proposition du cadre méthodologique proposé

3.1.1. La convergence dans le processus de conception

Le processus de conception est décrit par Buxton comme une succession de divergences et de convergences, dont l'objectif est d'arriver peu à peu à une solution optimale [BUXT, 2007]. Cet enchainement de divergences et de convergences est représenté sur la figure 57. Nous faisons apparaitre en plus les phases de Transformation évoquées par Asimow [ASIM, 1962], à la différence que nous considérons l'étape de transformation comme partie intégrante du processus de convergence et non comme une étape antérieure autonome. Le passage d'une phase à l'autre se fait par la formalisation du résultat d'une convergence, qui sert de point de départ à la divergence suivante. C'est ainsi qu'il est possible de passer d'une formalisation intermédiaire à une autre pour avancer dans le processus de conception. Nous notons F_i les formalisations considérées :

- F_0 : Besoins
- F_1 : Fonctions
- F_2 : Solutions conceptuelles
- F_3 : Solutions détaillées
- F_4 : Produits

L'ensemble de ces convergences est représenté sur la figure 56. On pourra noter qu'en début de projet, les divergences et les convergences peuvent être d'une forte amplitude, mais que celles-ci diminuent au cours du processus de conception afin d'atteindre une formalisation finale unique. Sur la figure 56 apparaissent en gris, les phases de transformation et de convergence que nous étudions.

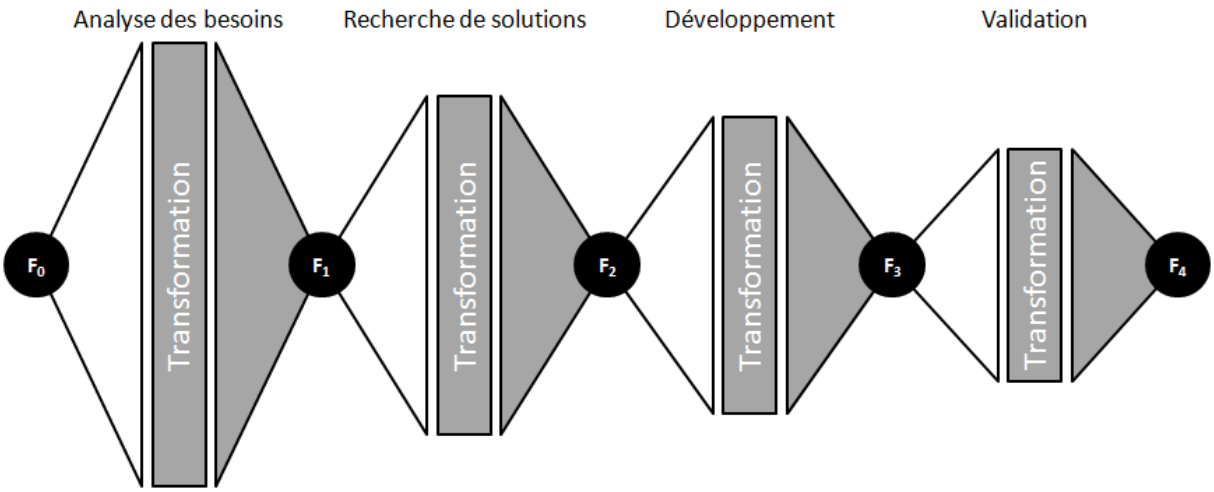


Figure 56 : Divergences, transformations et convergences dans le processus de conception

3.1.2. Modèle générique du processus de convergence multidisciplinaire

Afin de répondre à nos impératifs, il est nécessaire de caractériser les phases de convergence dans le processus de conception. Selon les observations des différentes phases de convergences multidiscplinaires, présentées dans le chapitre 4, nous pouvons définir un processus qui se veut générique, illustré par la figure 57, et constitué de trois grandes phases : préparation, réalisation, validation [TOMA 2003]. Ces phases permettent de distinguer différentes étapes du processus de convergence ainsi que les méthodes et outils qui leur sont associés.

La phase de préparation, similaire à la phase de transformation de Asimow, aura par exemple pour enjeu de mettre en évidence l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation de la convergence multidisciplinaire. C'est durant cette phase qu'il est indispensable que tous les concepteurs concernés par la convergence qui va suivre se comprennent. Cela passe par des Formalisations Intermédiaires communes, ou par des systèmes de traduction ou de réinterprétation des propositions de chacun. La difficulté principale qui existe lors de cette phase réside dans le fait qu'un grand nombre de propositions peuvent être apportées, et que l'état de conceptualisation n'est pas le même d'une de ces propositions à l'autre, et d'un métier à l'autre. D'autre part, les formalisations ne sont pas toujours les mêmes, ce qui peut créer des difficultés de compréhension.

Dès que la préparation se termine, la phase de réalisation de la convergence commence. Durant cette phase, des confrontations d'idées, de concepts, et plus globalement de démarches spécifiques à chaque métier sont opérées. La difficulté prévisible lors de cette phase est que chacun des métiers aura tendance à défendre ses propres solutions, ainsi que les enjeux relatifs à son approche.

Enfin, la phase de validation impose à chaque acteur de prendre du recul sur la ou les solutions résultantes, et de l'évaluer objectivement par rapport aux objectifs de conception. Cette validation se veut unanime ou à défaut, validée par le chef de projet.

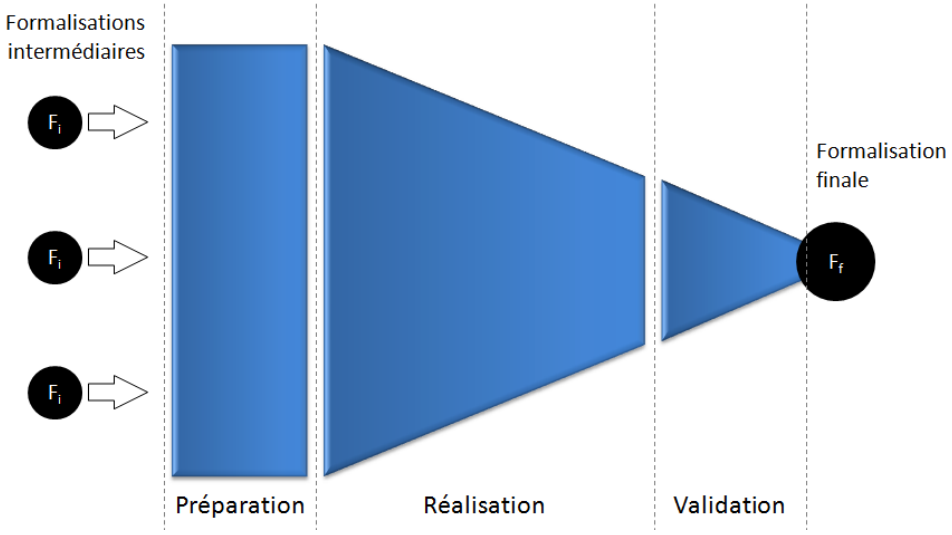


Figure 57 : Trois phases du processus de convergence

3.1.3. Détail du processus de convergence proposé

Pour aller plus loin dans le processus de convergence, nous proposons une représentation plus précise étape par étape du processus. Cette représentation, visible sur la figure 58, nous permet de mettre en évidence les différentes formalisations successives de l'objet conçu.

Le processus de convergence, représenté sur la figure 58, commence à partir de formalisations initiales, propres à chaque métier. La première étape de ce processus, représentant la phase de préparation évoquée précédemment, consiste à **transformer** les formalisations initiales en formalisations « compatibles » à tous les métiers. Ces formalisations, dites « de rang *n* », peuvent être universelles (dont l'ensemble peut être compréhensible par chacun des métiers), ou adaptables (disposant d'une base minimum permettant à chaque métier de se l'approprier et de l'adapter à ses propres méthodes et outils). La notion de transformation est l'étape principale de la phase de préparation d'une convergence, puisque c'est sur elle que se base l'ensemble des étapes suivantes. Cette première étape permet aussi de définir le problème de convergence ainsi que les objectifs à atteindre en termes de délais, de résultats attendus, et de moyens mis à disposition.

La deuxième étape de réalisation de la convergence consiste en la **confrontation** des différentes formalisations de rang n, afin d'aider les concepteurs à trouver une ou plusieurs solutions communes au problème. Cette étape se veut surtout collaborative, c'est-à-dire qu'elle doit permettre à chaque acteur d'intervenir sur l'objet conçu afin de réaliser différents commentaires et/ou modifications. L'ensemble des propositions est formalisé dans le cadre de formalisations « de rang n+1 », tel que le présente la figure 58.

Une fois les résultats de la convergence formalisés, la phase de **validation** consiste pour chaque acteur à évaluer les différentes propositions selon des critères propres à chaque métier. Lors de cette

étape de validation, il est important que chaque métier dispose de ses propres repères. Lorsque les résultats sont validés, une ou plusieurs formalisations finales marquent la fin de la convergence. En résultent des formalisations finales, qui deviennent par la suite des Formalisations Intermédiaires de conception (figure 56, page 114) dont l'objectif est de mettre en évidence le changement de phase dans le processus de conception [JEAN, 1995].

L'ensemble des étapes du processus de convergence est visible sur la figure 58. Nous y retrouvons les trois phases de préparation, de réalisation et de validation de la convergence, ainsi que les différentes formalisations observées.

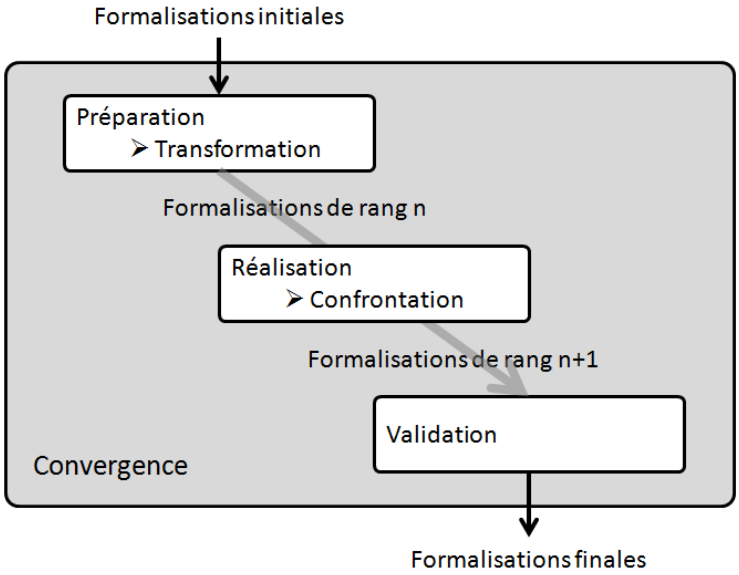


Figure 58 : Formalisation des étapes du processus de convergence

Il faut noter que ce processus de convergence ne s'applique pas seulement à une phase globale (amenant par exemple aux formalisations Fi évoquées précédemment). En effet, il est possible que durant une même phase du processus de conception, plusieurs convergences consécutives interviennent, en accord avec le modèle présenté par Buxton selon Pugh [BUXT 2007] [PUGH 1990]. Notre processus s'applique aussi lors de ces différentes étapes itératives.

3.2. Modèle de convergence multidisciplinaire

Afin d'enrichir notre modèle de convergence, nous intégrons de nouvelles notions que nous détaillons par la suite pour caractériser ce processus. Parmi elles, les itérations (mineures, moyennes et majeures) et les types d'accords (complet, partiel et arbitrage) permettent de caractériser les différentes convergences. Le modèle de la figure 57, enrichi par ces nouvelles notions, et représenté sur la figure 59, met en évidence l'impact de chaque type de confrontations sur la durée d'une itération. Il permet aussi de visualiser l'enjeu des itérations et en particulier le retour en arrière

qu'elles imposent, et qui constituent les plus grandes pertes de temps dans un processus de convergence.

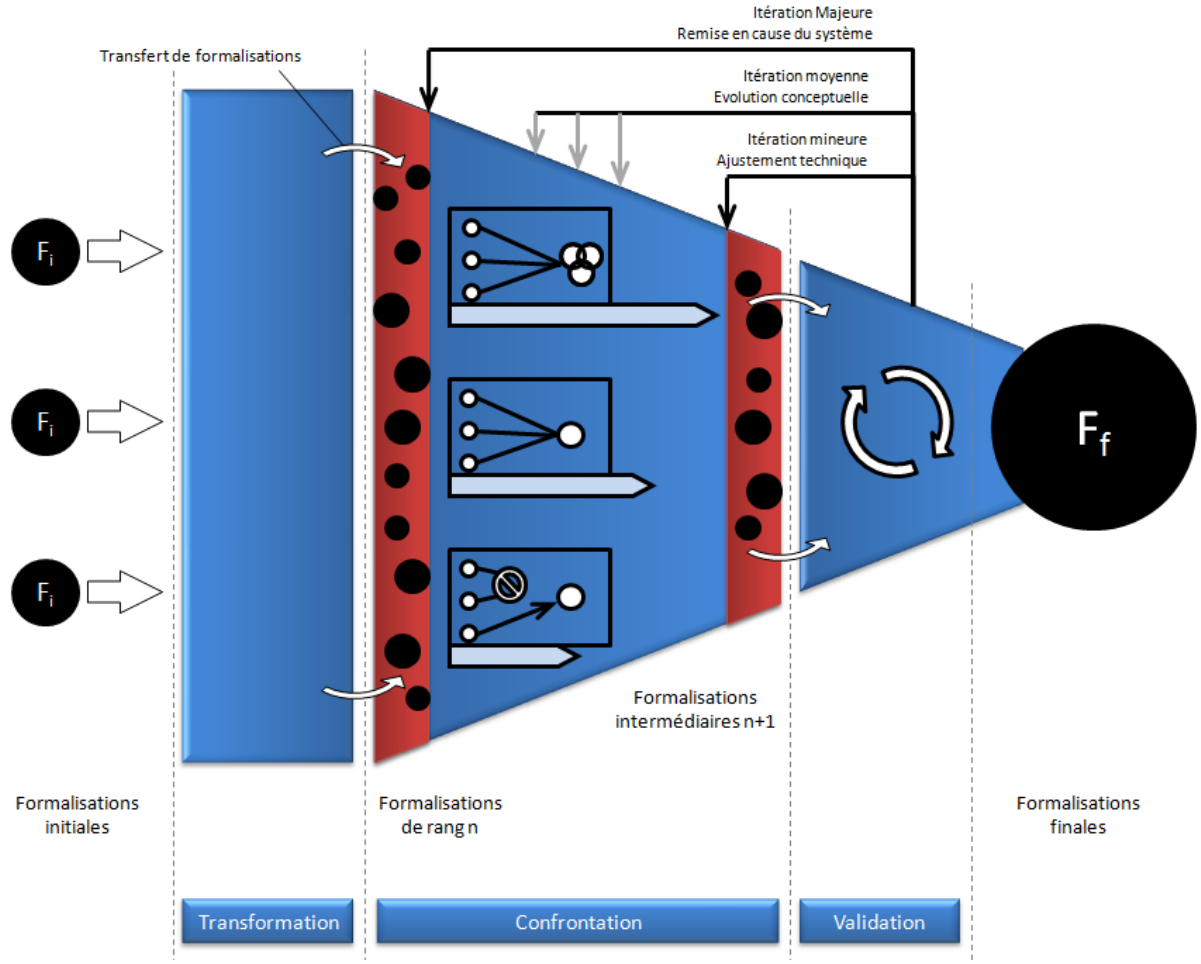


Figure 59 : Formalisation du processus de convergence

3.2.1. Caractérisation des confrontations en convergence

Nous pouvons observer que l'étape 2 (confrontation) est la charnière centrale du processus de convergence car c'est durant cette étape que les décisions sur l'avenir du produit conçu sont prises. Des discussions entre différents métiers sont réalisées afin de mettre en évidence les meilleures options existantes. Sur la base des projets de conception observés, et présentés dans les chapitres précédant, nous considérons qu'il existe trois types de résultats de confrontations :

- L'**accord complet**, peut être considéré comme la convergence « parfaite » puisqu'il permet à chacune des propositions initiales des différents métiers d'avoir un niveau de satisfaction maximum. Cela implique que les contraintes de chaque métier soient complètement compatibles. Cet accord complet, représenté sur la figure 60, est l'objectif idéal à atteindre, mais il est rarement atteint.

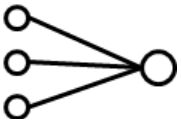


Figure 60 : Représentation de l'accord parfait en convergence

- L'**accord partiel**, qui représente la majorité des cas de convergence, consiste en une mise en accord après de multiples discussions, des différents acteurs, afin de trouver, *a minima*, une solution acceptable par tous (A ∩ B ∩ C). Cet accord partiel, représenté sur la figure 61, permet de laisser une flexibilité à la solution, afin de valider partie par partie la convergence. Cela implique donc, *a priori,* un processus de convergence plus long.

Figure 61 : Représentation de l'accord partiel en convergence

- L'**arbitrage**, souvent utilisé dans des cas où aucun accord n'a pu être réalisé. Lorsque les caractéristiques sont réellement incompatibles et que la mise en place d'un socle commun n'a pas pu être réalisée. Cet arbitrage, représenté sur la figure 62, consiste en une prise de décision, souvent réalisée par le chef de projet, et qui vise à abandonner certaines caractéristiques incompatibles, afin de rendre prioritaires d'autres caractéristiques. L'arbitrage permet, *a priori*, de prendre une décision plus rapidement dans le processus de convergence, mais implique une perte de certaines propositions, ainsi qu'une dégradation du résultat obtenu, puisque n'intégrant pas l'ensemble des contraintes avancées par chaque métier.

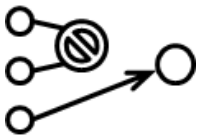


Figure 62 : Représentation de l'arbitrage en convergence

3.2.2. Caractérisation des itérations en convergence

Les confrontations présentées sont réalisées successivement au cours du processus de convergence, à l'occasion des différentes itérations. Nous soulignons qu'il existe trois types d'itérations. En effet, selon les résultats de l'évaluation durant l'étape de validation, de la figure 60, du processus de convergence, les modifications à apporter peuvent être mineures, moyennes ou majeures.

Nous introduisons ainsi ces trois niveaux d'itérations :

- L'**itération mineure**, qui implique un **ajustement technique** et un retour en fin d'étape de confrontation, afin de reprendre certains points souvent techniques de la formalisation de rang n+1 (exemple : modification de la valeur finale d'un critère fonctionnel, d'une dimension, etc.),
- L'**itération moyenne**, qui implique une **évolution conceptuelle**, et un retour à un stade plus ou moins avancé de l'étape de confrontation, ainsi qu'une reprise d'une partie des discussions réalisées (exemple : modification d'une fonction, d'un élément technique, d'un matériau, etc.),
- L'**itération majeure**, qui implique la **remise en cause complète de la convergence et de son résultat**, et un retour au début de l'étape de confrontation, juste après la formalisation de rang n (exemple : remise en cause de la cible, d'un principe de solution, etc.).

3.3. Proposition de méthodologie de convergence multidisciplinaire

Sur la base de la description du processus de convergence, et en accord avec les résultats mis en évidence dans les chapitres 3 et 4, nous proposons la formalisation d'une méthodologie de convergence multidisciplinaire. Par multidisciplinaire, on entend une convergence faisant intervenir au minimum deux acteurs de disciplines différentes (dans notre cas, nous avons étudié les disciplines de Conception Mécanique, Design Industriel et Ergonomie). Cette méthodologie se structure selon les trois phases définies dans le §3.1.2., page 114 : Préparation, réalisation, validation. La figure 63 présente la méthodologie que nous proposons, selon la norme IDEF0.

Une première phase de **préparation (A1)** de la convergence permet, à partir d'un problème de convergence et de formalisation initiale, de définir des méthodes et outils nécessaires à la convergence à venir, mais aussi de préparer et transformer les formalisations initiales afin de leur permettre d'être comprises par chacun des concepteurs.

La phase 2 de **réalisation (A2)** de la convergence permet d'identifier des contradictions et d'apporter des éléments correctifs afin de résoudre les problèmes de convergence. Ces éléments sont le résultat des confrontations et des discussions opérées entre les concepteurs concernés. En résultent les formalisations de rang n+1.

Enfin, la phase 3 de **validation (A3)** permet de valider les formalisations qui deviennent « finales » ou de réaliser des itérations plus ou moins grandes. En cas d'insatisfaction, ces itérations permettent de revenir à différentes étapes du processus selon la modification nécessaire.

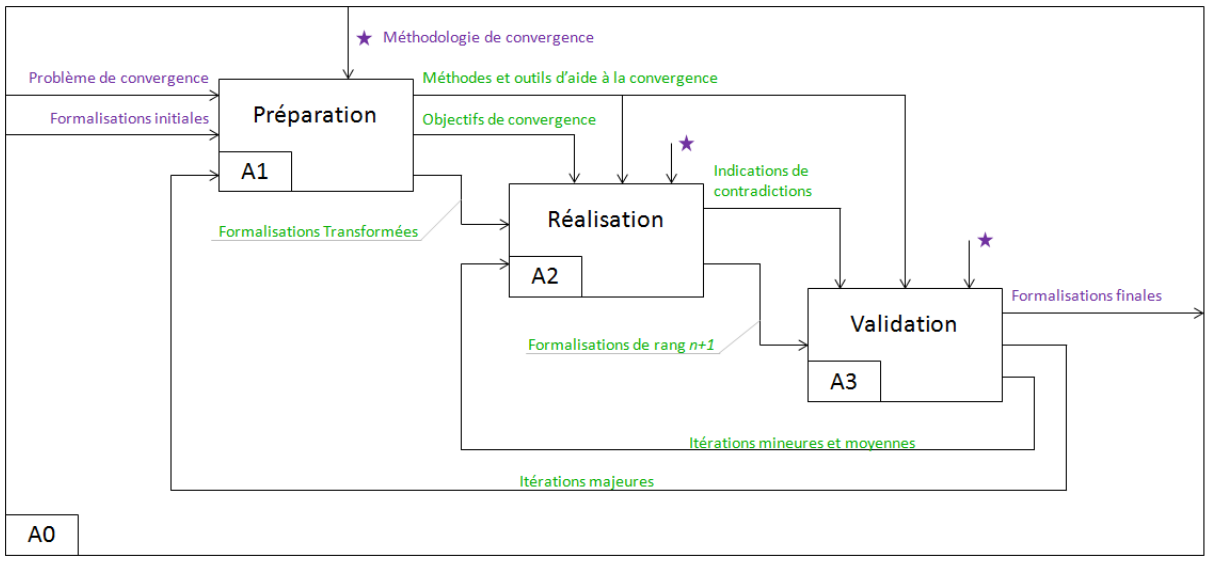


Figure 63 : A0 – Méthodologie de convergence en conception, représentée selon la norme IDEF0

3.3.1. Phase 1 : Préparation de la convergence

La première phase de la méthodologie présentée permet de définir un cadre de convergence. La figure 64 illustre cette phase ainsi que les différentes étapes qui la constituent. Après une définition des objectifs, elle se base sur une définition des attributs impactant les convergences, relatives au produit, au projet et aux métiers concernés. L'objectif de cette phase est essentiellement de définir des méthodes et des outils afin de faciliter la mise en œuvre des convergences à venir, en fonction des attributs et du contexte établis. Enfin, une étape d'interprétation et de transformation des formalisations initiales permet une meilleure compréhension des données d'entrée par tous les concepteurs concernés par la convergence.

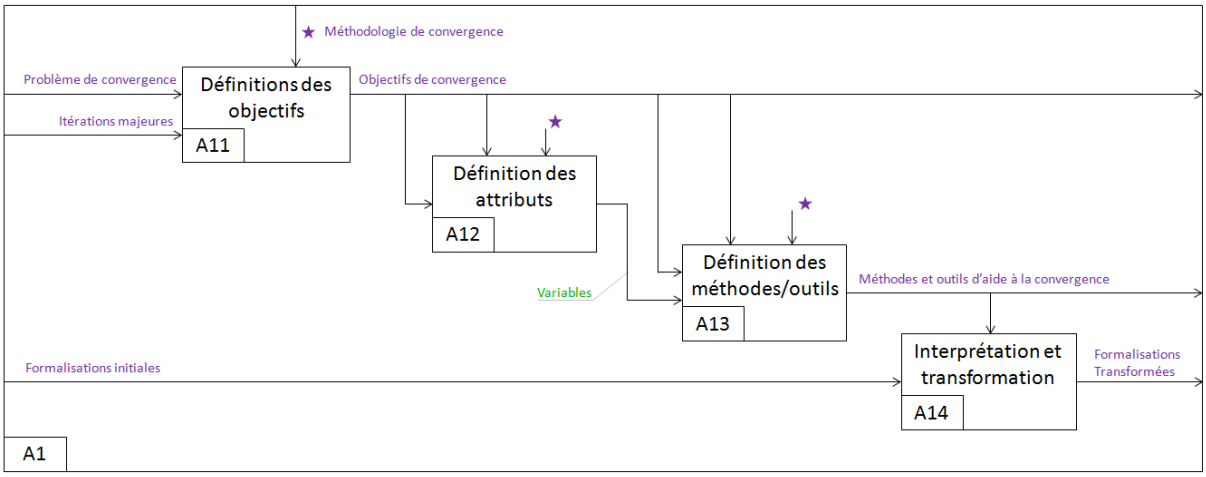


Figure 64 : A1 - Phase de préparation de la convergence, représentée selon la norme IDEF0

3.3.1.1. A11 : Définition des objectifs de la convergence (figure 64)

Les objectifs de convergence se formalisent de la même manière que les objectifs de conception. Ils peuvent apparaitre sous la forme d'une problématique générale ou d'un problème très concret.

Un certain nombre d'éléments précis, tels que l'état du projet avant la convergence, l'état ciblé à la fin de la convergence, et les métiers concernés doivent apparaitre. Une fois les objectifs fixés, les métiers concernés se réunissent autour du chef de projet afin de définir la suite de la procédure de convergence.

3.3.1.2. A12 : Définition d'attributs impactant la convergence (figure 64)

L'enjeu de la définition d'attributs d'entrée est de mettre en évidence, en fonction des objectifs, les types de convergence à considérer ainsi que les méthodes et les outils nécessaires à sa mise en œuvre. Pour cela, trois familles d'attributs sont à traiter : les attributs relatifs au **processus de conception**, aux **métiers concernés**, ainsi qu'au **produit conçu**.

Le triptyque d'attributs permet de caractériser l'ensemble des facteurs impactant le processus de convergence.

Tout d'abord, les attributs relatifs au **processus de conception** jouent un rôle de cadre de la convergence. Ils vont définir les moyens mis à disposition pour la convergence concernée. Parmi ces attributs pourront être considérées (figure 65) :

- Les **contraintes de projet** : Il s'agit des contraintes externes qui s'appliquent au projet. Par exemple, les contraintes financières joueront un rôle prédominant dans les solutions technologiques apportées en termes d'outils. De même, les limites humaines, matérielles et temporelles imposeront aux équipes de conception de faire des choix en termes d'outils et de méthodes.
- la **phase du processus** de conception ciblée par la convergence. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, chaque phase du processus de conception est constituée d'une divergence, d'une transformation et d'une convergence. Ainsi, notre méthodologie s'appliquant à chacune des phases, elle doit en tenir compte dans la définition des méthodes et outils associés. Par exemple, une convergence de la phase d'analyse des besoins, vers des fonctions ne peut pas se faire de la même manière qu'une convergence de la phase de développement technique, vers un prototype.

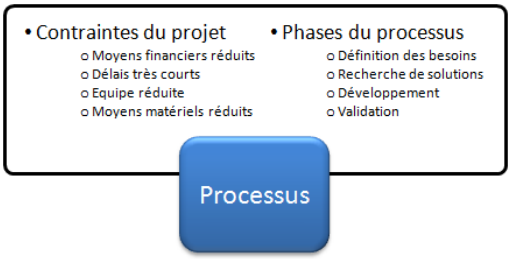


Figure 65 : Attributs relatifs au processus de conception

Les attributs relatifs aux **métiers concernés** permettent, quant à eux, de caractériser plus précisément chaque convergence. Ils permettent notamment de définir les métiers concernés par la convergence et l'impact qu'ils pourront avoir. Parmi ces attributs sont considérées (figure 66) :

- les **disciplines** concernées par la convergence, dans notre cas 2 ou 3 disciplines parmi l'ergonomie, la conception mécanique et le design industriel. Il semble évident qu'une convergence entre un ergonome et un designer industriel n'impliquera pas les mêmes moyens qu'une convergence entre un designer industriel et un concepteur mécanicien par exemple. Cela est dû en particulier à la culture de chacun des métiers, qui leur impose un bagage en termes d'outils et de méthodes. Ainsi, chacun voit le produit conçu selon une approche différente. Les convergences, tout comme la méthodologie globale de conception présentée dans le chapitre 3, doivent s'adapter à ces spécificités.

- les **rôles** affectés à chaque acteur de la convergence. En effet, comme nous l'avons vu, malgré notre positionnement considérant le concepteur mécanicien comme chef de projet, chaque acteur peut prendre le leadership de la convergence et ainsi donner plus de poids à ses actions. En laissant la possibilité à chaque acteur de prendre le rôle de chef de projet, nous prévoyons une ouverture de notre méthodologie à d'autres approches que la nôtre. Une autre notion que nous intégrons dans le cadre de cette variable est la notion d'expert métier, c'est-à-dire un acteur spécialiste de sa discipline qui peut intervenir en tant qu'acteur externe ou interne au projet de conception.

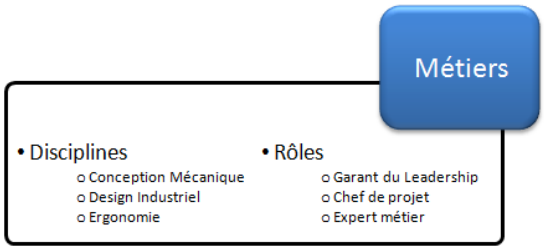


Figure 66 : Attributs relatifs aux métiers

Enfin, les attributs relatifs au **produit conçu** concernent l'objet de la convergence à proprement parler. C'est avec ces attributs qu'il sera possible de définir les données (formelles et informelles) utilisables dans le cadre de la convergence. Nous soulignons notamment les attributs relatifs (figure 67) :

- Aux **aspects** du produit. Ces aspects sont définis dans le chapitre 4, page 107 (Fonctionnel, Structurel, Géométrique, Dynamique, Physique). L'idée est de déterminer quels éléments du produit sont impactés par la convergence, s'ils dépendent d'un seul aspect ou de plusieurs. Par exemple, la convergence vers un choix de matériau impliquera les aspects physiques et géométriques du produit. En effet, la définition d'un matériau remettra en cause sa forme. Les différents aspects ne peuvent pas être étudiés avec les mêmes méthodes et outils.
- A la maturité de la **formalisation**, c'est-à-dire à l'état d'avancement concret du produit en cours de conception. Par exemple un concept formalisé au crayon sur une feuille de papier, ou un prototype fonctionnel réalisé en matériau d'essai (bois ou mousse). Cet état d'avancement indique les données qu'il sera possible de prendre en compte dans le processus de convergence lors de l'utilisation des méthodes et outils. Ainsi, une optimisation à l'aide d'outils de simulation numérique ne pourra se faire que si l'on dispose d'une modélisation numérique. Dans le cas contraire, il sera nécessaire de prévoir une phase de formalisation intermédiaire afin de préparer au mieux la convergence.

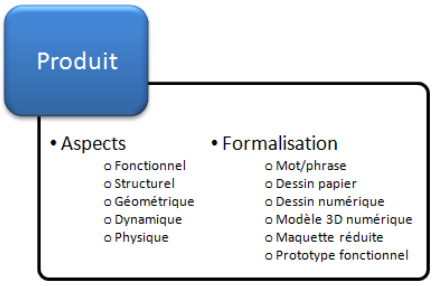


Figure 67 : Attributs relatifs au produit

L'ensemble de ces attributs amène à un choix des méthodes et outils de convergence les plus adaptés en fonction d'un triptyque nommé M2P pour « Métier – Produit – Process », représenté sur la figure 68.

Pour chaque configuration de ce triptyque, des outils de convergence seront préférés à d'autres. Par exemple, si les moyens financiers et les délais sont réduits, les supports utilisés devront être accessibles et flexibles. Une convergence à partir d'un modèle CAO et d'un tableau collaboratif de visualisation, avec modification en temps réel, pourra être pertinente.

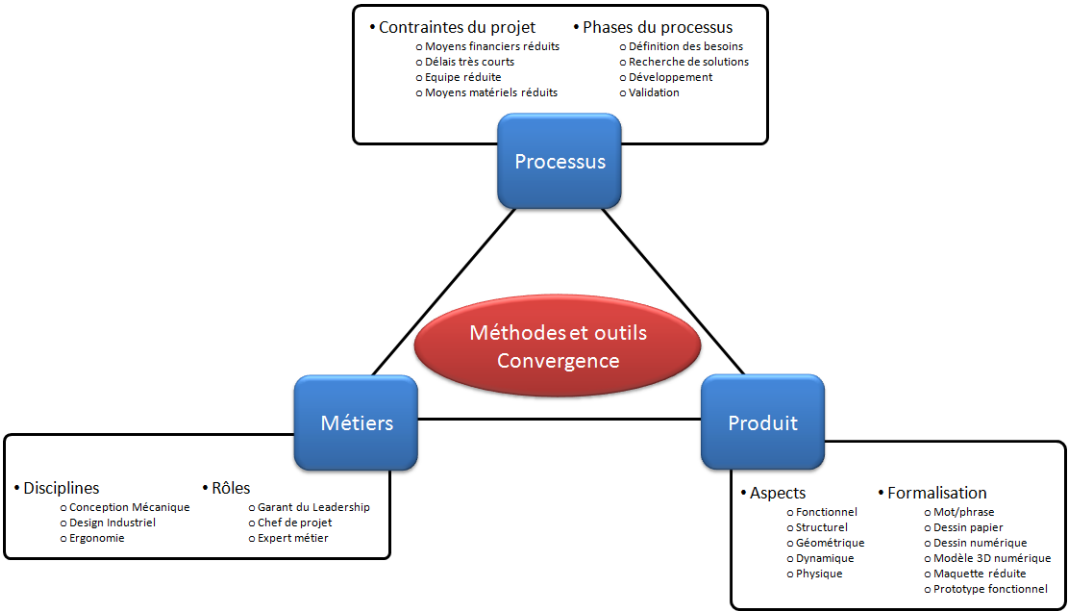


Figure 68 : Triptyque M2P – Métier-Produit-Processus

3.3.1.3. A13 : Définition des méthodes et outils (figure 64, page 120)

L'étape de définition des méthodes et outils est déterminante pour la réalisation de la convergence. En effet, c'est d'elle que dépendront les moyens donnés aux acteurs de la conception. L'objectif de cette étape est de déterminer en fonction des différents facteurs présentés précédemment, les méthodes et les outils les plus pertinents à mettre en œuvre pour une convergence multidisciplinaire.

Une fois les attributs définis, nous articulons notre méthodologie selon une typologie des méthodes et outils pouvant convenir.

Afin de définir cette typologie, nous proposons de considérer les supports de formalisation, plutôt que les méthodes et outils eux-mêmes. En particulier, nous prenons en compte deux aspects : la **nature** du support (Physique ou Numérique), et la **dimension** du support (2D ou 3D). Ainsi, nous couvrons de manière exhaustive l'ensemble des supports d'aide à la convergence. A titre d'exemple, la figure 69 présente différents supports répertoriés selon les deux aspects présentés sur les axes des abscisses et ordonnées.

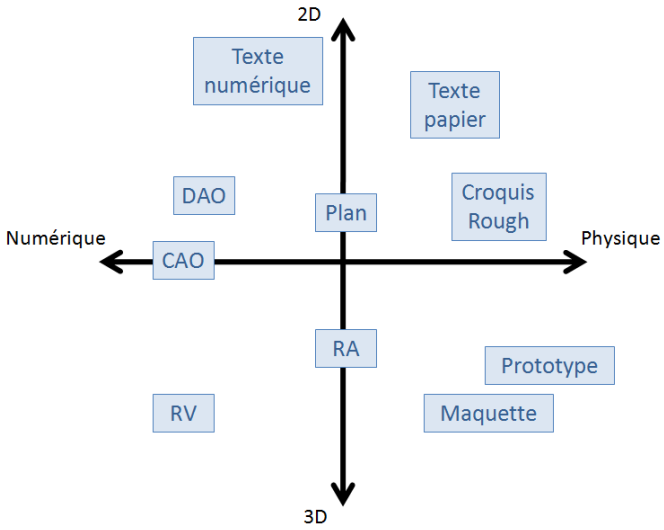


Figure 69 : Exemple de répartitions de supports

La distinction réalisée entre la **Nature** des supports (physique et numérique) se base sur les facilités d'interaction et de modification de la formalisation. Un texte, un dessin ou un plan, tout autant qu'une maquette ou un prototype, impliqueront une modification sous forme d'une correction. Dans certains cas, la formalisation peut être corrigée sans laisser de trace (crayon/gomme, tableau blanc Velléda, maquette en pate à modeler, etc.). A l'inverse, les supports numériques permettent pour la plupart une édition des modifications des données sous forme numérique, souvent en temps réel.

La **Dimension** joue quant à elle un rôle important dans l'appropriation de la formalisation par l'acteur métier. Selon leur discipline, leur expérience et leur expertise, les concepteurs seront plus à l'aise avec un support ou avec un autre. Certains concepteurs apprécient les supports 2D (sur supports physiques ou numériques) car ils leurs permettent de libérer leur esprit et de projeter eux même les différentes formalisations intermédiaires dans leur imagination. A l'inverse, d'autres préfèrent les supports 3D afin de visualiser plus facilement les formalisations intermédiaires et de pouvoir les évaluer rapidement.

Une étude menée par Hannah *et al*, a permis de mettre en évidence les performances d'interprétation en fonction du type de support utilisé [HANN 2012]. Croisant les formalisations fidèle et approximative, et les formalisations 2D et 3D, au travers de l'étude d'esquisses, de dessins appliqués, de maquettes en carton et de prototypes fonctionnels, les auteurs ont permis de mettre en évidence que toutes les informations ne pouvaient pas être transmises de la même manière selon le type de support employé. Les trois types d'informations traitées concernaient l'aspect fonctionnel du produit, l'aspect géométrique, et l'aspect fabrication. Il en résulte que les formalisations fidèles ne sont pas toujours indispensables, notamment lorsqu'il s'agit d'expliquer le fonctionnement du système.

Sur la base des observations réalisées dans le chapitre 3 (sur les projets de conception de mobilier urbain), et dans le chapitre 4 (sur les projets de conception d'un véhicule et d'un poste de test de carte imprimée), nous proposons de définir une cartographie des natures et dimensions des supports utilisés en fonction de la phase du processus de conception considérée, et des métiers concernés par la convergence.

Pour cela, nous proposons une cartographie de type « diagramme bâton » pour chaque étape du processus de conception, et selon le type de convergence considéré. Afin de définir la pertinence de chaque famille de support, nous nous sommes basés sur le nombre d'utilisation de chacun des supports dans le cadre des projets observés. A titre d'exemple, la figure 70 montre que dans le cas d'une convergence donnée, les supports 2D physiques sont prédominants et fortement utilisés. Les supports 3D physiques sont eux aussi utilisés de manière significative. En revanche, les supports numériques sont nettement moins utilisés.

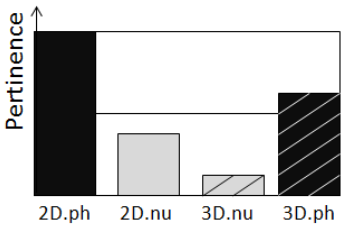


Figure 70 : Diagramme bâton des différents types de supports (nu = numérique ; ph = physique)

Cette évaluation se veut basée sur la capitalisation de connaissances durant les projets déjà réalisés, et dépend d'un grand nombre de caractéristiques, comme notamment l'organisation de l'entreprise ainsi que ses moyens, mais aussi les outils disponibles et les métiers concernés.

Dans le cadre de nos travaux, quatre convergences sont ciblées :

- « Ergonomie – Conception Mécanique » (E-CM),
- « Design Industriel – Conception Mécanique » (DI-CM)
- « Ergonomie – Design Industriel » (E-DI)
- « Ergonomie – Design Industriel – Conception Mécanique (E-DI-CM).

La convergence E-DI sera présentée à titre prospectif mais elle n'a pas été étudiée de manière approfondie. En effet, elle n'entre pas dans notre positionnement scientifique qui place le concepteur mécanicien au centre de notre processus de conception et donc de convergence. De fait, la cartographie présentée pour cette convergence a été définie arbitrairement suite à l'observation d'un projet de conception.

Il résulte de cette cartographie la proposition formalisée par la figure 71. Le processus de conception est représenté sur l'axe des abscisses. Nous pouvons y retrouver les différentes phases ainsi que les divergences, les transformations et les convergences. Sur l'axe des ordonnées sont représentées les différentes convergences observées. Nous notons qu'il est tout à fait possible d'ajouter d'autres types de convergence avec des disciplines supplémentaires de la conception (Marketing, Sociologie, Commercialisation, Fabrication, etc.). Au croisement d'une convergence et d'une étape du processus de conception, les outils sont cartographiés comme nous l'avons évoqué, selon un diagramme bâton représentant la pertinence de chaque famille d'outils (2D/3D ; Physique/Numérique).

Globalement, nous observons que les supports 2D et 3D Physiques sont très utilisés dans la convergence de la première phase d'analyse des besoins pour chaque type de convergence. Cela vient essentiellement du fait que les premières formalisations sont des produits existants, mais aussi des croquis réalisés par les concepteurs, ainsi que des formalisations des besoins sous forme de texte.

Nous observons que dans la phase 2 de recherche de solutions, les supports tendent à s'équilibrer et sont tous sollicités par les concepteurs dans le cadre des convergences multidisciplinaires. Nous notons que la convergence E-CM utilise davantage les supports 3D, alors que la convergence DI-CM utilise plutôt les supports 2D. Cette distinction semble venir des habitudes d'usage des ergonomes et des designers industriels observés. Les concepteurs mécaniciens assuraient quant à eux, un rôle central et flexible, devant s'adapter aux supports de chacun des concepteurs. Il faut aussi noter que la cartographie proposée provient de quelques projets uniquement et qu'il sera nécessaire de la développer en étudiant plus de cas de projets.

Lors de la phase 3 de développement, les supports 3D numérique représentent la majorité des supports utilisés. En effet, les technologies telles que la réalité virtuelle permettent d'apporter des réponses significatives dans le cadre de convergence multidisciplinaire. La phase 3 est la plus propice à l'utilisation de ces technologies car elle se base sur des formalisations numériques type modèle CAO, qui peuvent être directement importées sur une plateforme de réalité virtuelle.

Enfin, la phase 4 de validations techniques voit les supports 3D, et en particulier 3D physiques, s'imposer dans le cadre des convergences multidisciplinaires. En effet, la validation par la mise à l'épreuve d'un prototype réel permet une simulation de l'usage et de l'estime du produit futur.

Si l'on regarde la figure 71 selon les ordonnées et les phases de convergence, on peut voir que dans les phases de recherche de solutions, de développement et de validations techniques, les convergences E-CM et DI-CM utilisent de manière régulière des supports 3D numériques.

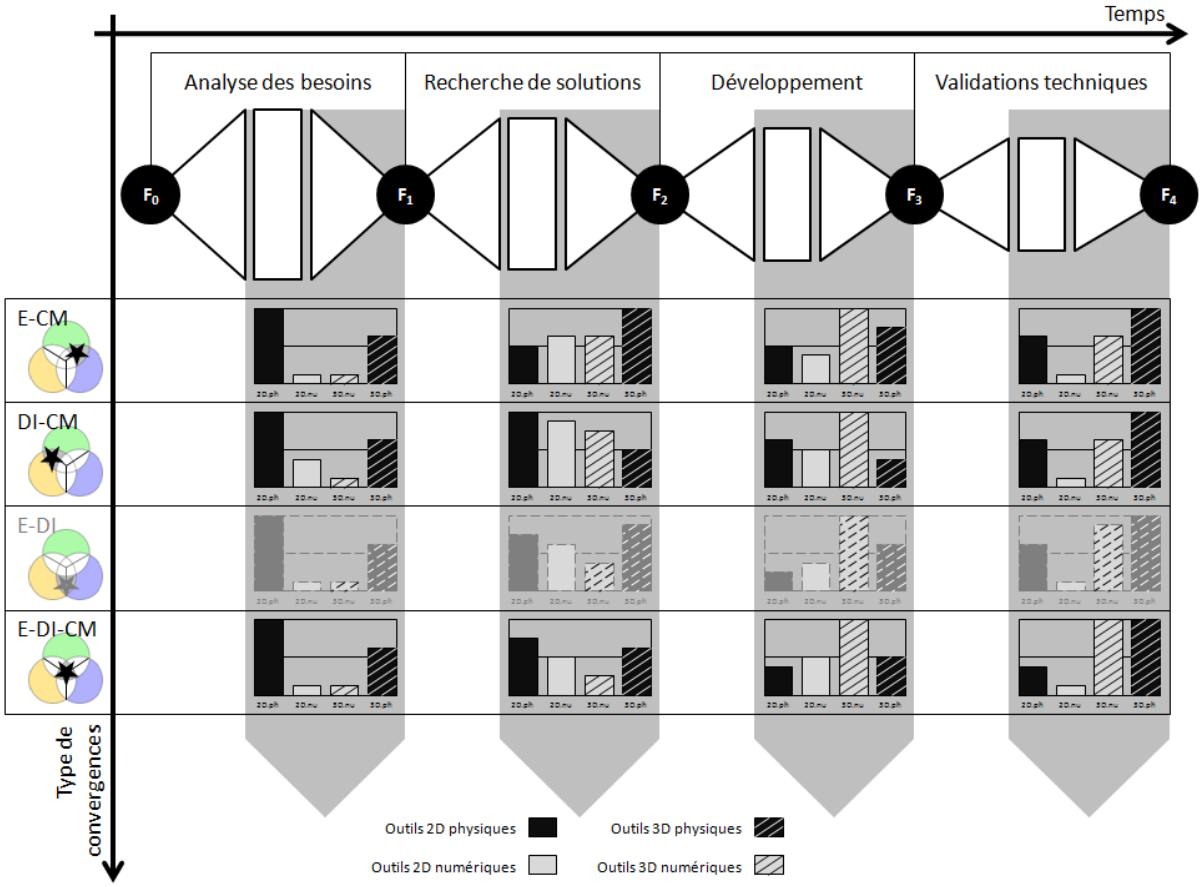


Figure 71 : Cartographie des outils selon les types de convergence et les phases du projet de conception

Nous pouvons maintenant facilement associer à cette cartographie un certain nombre de méthodes et outils existant, et pouvant intervenir dans le cadre d'une convergence multidisciplinaire. C'est par exemple le cas avec l'analyse fonctionnelle présentée dans la méthode APTE [BRET 2000], et pouvant être utilisée dans toutes les convergences de la phase 1 d'analyse des besoins. Cette analyse fonctionnelle, formalisée par des supports 2D physiques (souvent au format texte), peuvent permettre au concepteur mécanicien de traduire un certain nombre de fonctions souhaitées par l'ergonome ou le designer industriel.

Toujours dans cette même optique, il est possible de citer dans le cadre de la phase de développement, l'utilisation de mannequins numériques (supports 3D numérique) afin de valider un

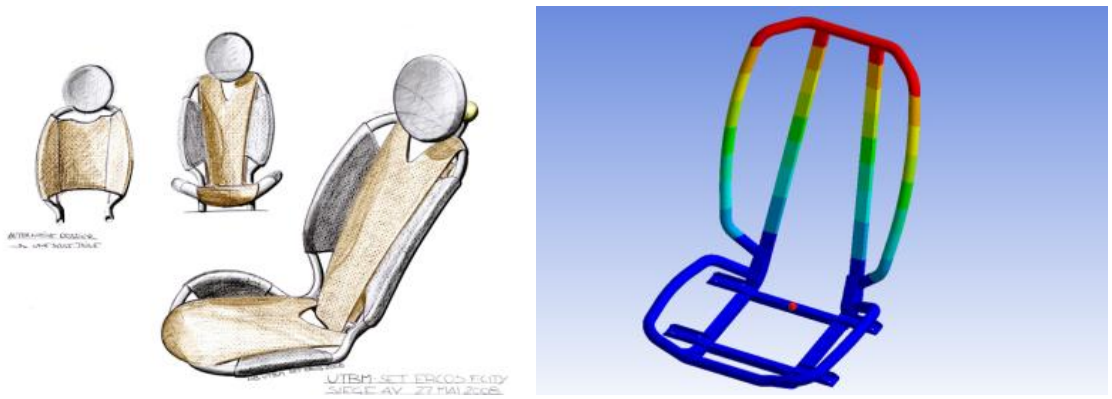
maximum d'éléments dès la phase de développement. Ces solutions de simulation de l'usage sont des outils très performants de convergence multidisciplinaire car ils sont compréhensibles par tous. Ces validations précoces permettent de réduire les coûts de prototype et de limiter les itérations de la dernière phase de validation.

Enfin, pourront être citées, pour cette dernière phase de validation, les simulateurs (automobiles par exemple), dont l'objectif est de reproduire dans un environnement virtuel, l'usage, mais aussi l'estime, d'un produit réel. Ainsi, ce type de plateforme repose sur la formalisation 3D physique du produit à valider.

3.3.1.4. A14 : Interprétation et transformations des formalisations initiales (figure 64, page 120)

La préparation (ou de transformation) de la convergence est une phase durant laquelle les formalisations initiales doivent être interprétée par les concepteurs. L'objectif est de permettre à chacun d'eux de s'approprier les formalisations de départ et de se comprendre dès le début de la convergence.

Ainsi, pour l'exemple d'une convergence DI-CM, plusieurs types de formalisations peuvent être à considérer : les croquis réalisés sur papier par le designer industriel (figure 72 à gauche) ou la modélisation CAO réalisée par le concepteur mécanicien (figure 72 à droite). Dans les deux cas, il est nécessaire que le Designer Industriel et le Concepteur Mécanicien comprennent l'ensemble des formalisations. Différents outils d'interprétation définis dans l'étape précédente peuvent être proposés aux acteurs pour assurer cette étape.



Figures 72 : Formalisations initiales – Convergence DI-CM en phase 3 de développement

3.3.2. Phase 2 : Réalisation de la convergence

La deuxième phase de la méthodologie que nous proposons est le cœur même de la convergence, c'est-à-dire sa réalisation. La figure 73 détaille les différentes étapes concernées. La première d'entre elles consiste à définir les différentes contradictions à partir de la définition du problème de

convergence et des formalisations transformées, et considérées comme étant de « rang n ». Une fois que les contradictions sont définies, une étape de recherche de solutions permet d'apporter des réponses aux problèmes ciblés. Ces solutions sont formalisées dans une troisième étape afin d'aboutir à des formalisations de rang n+1.

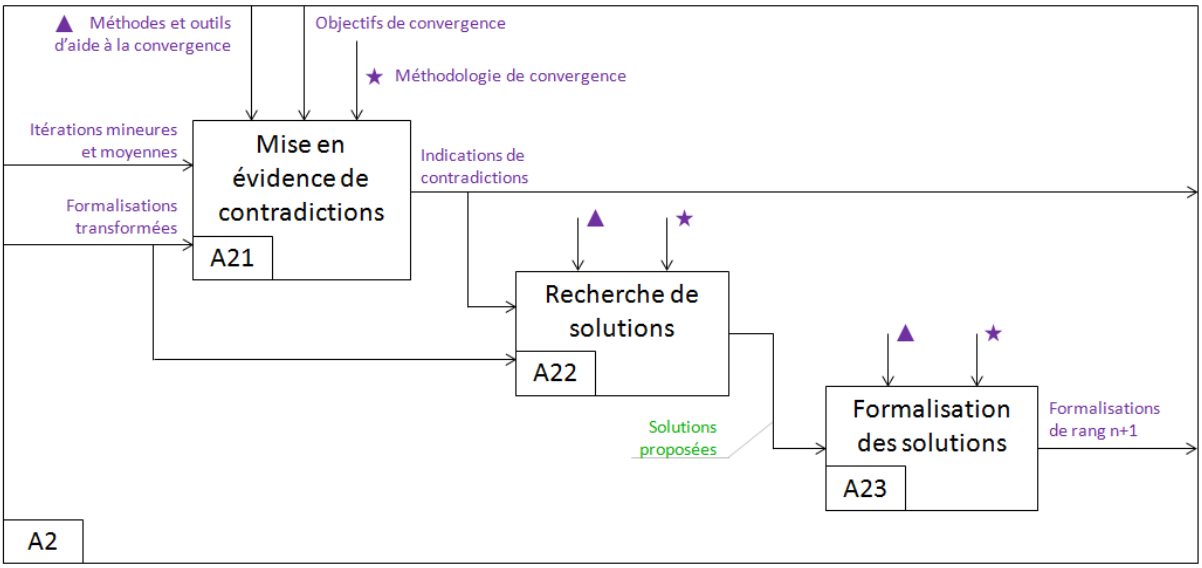


Figure 73 : A2 - Phase de réalisation de la convergence, représentée selon la norme IDEF0

3.3.2.1. A21 : Mise en évidence de contradictions (figure 73)

Les contradictions initiales précisent le problème de la convergence déjà défini dans l'étape A11 de la figure 64.

Ces contradictions peuvent se présenter sous la forme d'un cahier des charges de convergence, avec différents objectifs à remplir. Cela peut aussi être une approche similaire à la méthode TRIZ dont l'objectif est de confronter deux contradictions (par exemple : « le produit doit être lourd pour être maintenu au sol sans système de fixation » et « le système doit être léger pour permettre aux installateurs de le transporter sans outillage »).

Il sera donc nécessaire de prendre soin à la formulation de ces contradictions, car elles seront énoncées par des concepteurs de corps métiers et donc de cultures différentes.

3.3.2.2. A22 : Recherche de solutions (figure 73)

L'étape de recherches collectives de solutions permet, tout comme dans une phase de recherche de solution dans le processus de conception, d'apporter un ensemble de réponse à un problème donné. Le contexte nous place dans un système de résolution d'un problème de convergence. Les solutions apportées résident dans la manipulation des différents aspects du produit, afin de rendre compatibles les propositions formalisées par les différents concepteurs dans le cadre d'accords partiels ou complets.

Ainsi, un ensemble de méthodes et d'outils basés sur les technologies de réalité virtuelle peuvent permettre à un concepteur mécanicien et à un designer industriel de réaliser ensemble des recherches de compromis. Par exemple, l'interface développée au sein du laboratoire SET de l'UTBM et présentée dans le chapitre 4, visant à permettre de configurer dans un environnement virtuel immersif, un modèle numérique 3D d'un véhicule, afin d'en modifier les couleurs, les textures et les matériaux. L'enjeu est d'atteindre collectivement une solution acceptable par chacun (figures 74).

Figures 74 : Configurateur Matériau-Texture-Couleur

3.3.2.3. A23 : Formalisation des solutions (figure 73)

Lorsque les recherches de solutions aboutissent, les résultats sont repris pour une formalisation « de rang n+1 ». Cette étape de formalisation intermédiaire permet de soumettre les solutions apportées par les différents acteurs à l'étape de validation suivante.

Comment les autres étapes de formalisation, la formalisation de rang n+1 peut être réalisée sur différents supports (2D, 3D, physique ou numérique). Elle peut constituer une reformalisation de l'objet depuis le départ, ou une modification de la formalisation de rang n.

Cette reformalisation ou modification peut être assurée par un ou plusieurs des concepteurs, avec l'aide d'outils adaptés prenant en compte les techniques de formalisation de chacun des acteurs.

Dans le but de comparer le plus rapidement possible les formalisations entre elles, l'utilisation de la Réalité Augmentée peut s'avérer très pertinente. Plus légère et plus rapide à mettre en œuvre que

la Réalité Virtuelle, la Réalité Augmentée permet une évaluation de l'aspect général d'un modèle 3D numérique dans un environnement physique. Une formalisation 3D numérique peut ainsi être facilement comparée à une formalisation 3D physique, tel que nous pouvons le voir sur la figure 75.

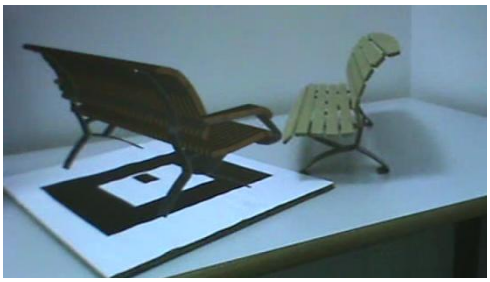


Figure 75 : Réalité Augmentée – formalisation numérique et physique de deux solutions à l'échelle 1/5e

L'idée est aussi de pouvoir proposer facilement une formalisation physique figée à laquelle viendrait s'ajouter plusieurs formalisations numériques évolutives, propres à chaque métier par exemple.

3.3.3. Phase 3 : validation de la convergence

La phase de validation de la convergence, illustrée par la figure 76, permet de mettre à l'épreuve l'ensemble des résultats issus de la phase de réalisation. Cette phase se traduit par une évaluation des solutions ainsi qu'une confrontation de ces solutions aux objectifs initiaux définis dans la phase 1 de préparation de la convergence et généralement traduits par les indications de contradiction. Cette évaluation peut aboutir, en cas d'insatisfaction aux objectifs, à des itérations (mineures, moyennes ou majeures), ou en cas de satisfaction, à une formalisation finale qui scelle la procédure de convergence.

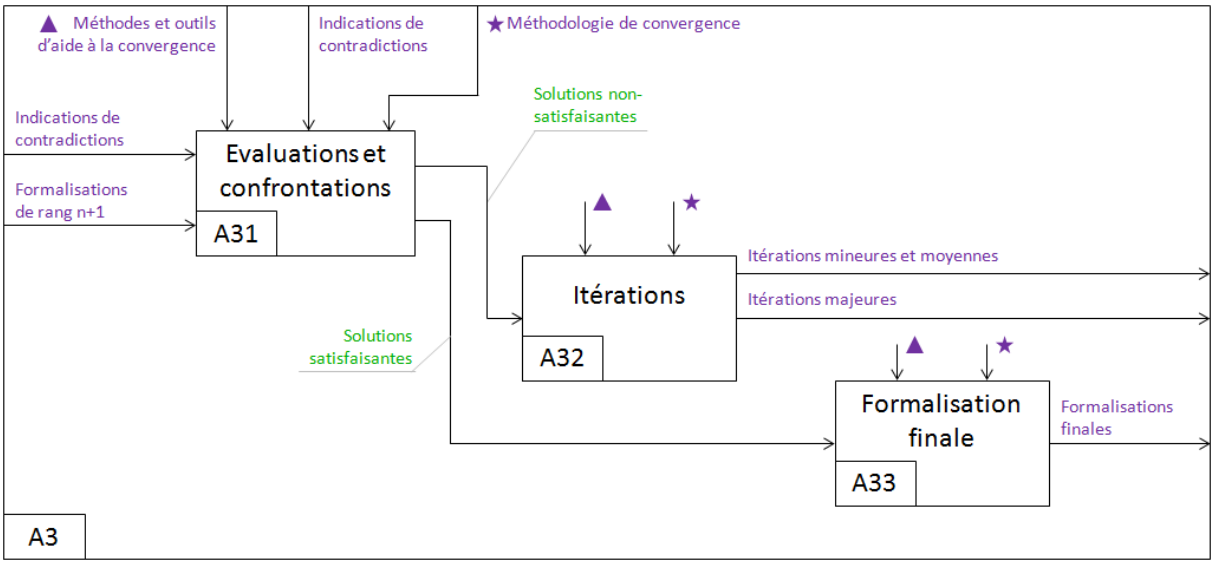


Figure 76 : A3 - Phase de validation de la convergence, représentée selon la norme IDEF0

3.3.3.1. A31 : Evaluation des solutions formalisées et confrontation des résultats aux objectifs (figure 76)

L'évaluation des solutions formalisées est une étape importante de notre méthodologie de convergence multidisciplinaire car elle implique que chacun des concepteurs doit être en mesure de comprendre l'ensemble des solutions présentées, et de les confronter aux objectifs initiaux de convergence.

Afin de permettre un maximum d'échanges, il est préférable que les évaluations des solutions soient réalisées par toutes les disciplines simultanément. Cela implique que les outils et méthodes d'évaluation doivent être suffisamment flexibles ou accessibles pour permettre à tous les métiers de les utiliser. Là encore, la Réalité Virtuelle nous a montré sa pertinence en termes de réactivité, de collaboration (modification en temps réel d'une interface selon les métiers l'utilisant) et de visualisation (modification du mode d'affichage en temps réel). De plus, elle permet une évaluation tôt dans le processus, des situations d'usage, des aspects techniques et de la perception finale du produit (figure 77).

Figure 77 : Validation numérique en temps réel

3.3.3.2. A32 : Itérations (figure 76)

Les itérations, qu'elles soient mineure (ajustement technique), moyenne (évolution conceptuelle) ou majeure (remise en cause du système), constituent une perte de temps qu'il est nécessaire de limiter. Néanmoins, il est indispensable de les prévoir afin de ne pas être pénalisé lorsqu'elles apparaissent nécessaires.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe « Modèle de convergence multidisciplinaire » (§3.2, page 116), plusieurs types d'itérations peuvent intervenir, du simple ajustement technique à la remise en cause du système intégral. Selon les cas, ces itérations vont amener les concepteurs à revenir plus ou moins loin dans le processus de convergence.

En cas d'ajustement technique, le plus souvent, on va revenir à la dernière étape de formalisation afin de modifier la valeur d'un élément (dimension, matériau, etc.). En cas d'évolution conceptuelle,

c'est l'orientation de la convergence qui est remise en cause, et il est possible de revenir à la recherche de solutions et aux discussions associées, afin de faire évoluer les solutions proposées en tenant compte de l'évaluation réalisée. Enfin, il est possible que l'on remette en cause intégralement la convergence en cours, et que l'on modifie les formalisations initiales, les objectifs de convergence ou même les outils d'aide à la convergence. Dans ce cas, le travail réalisé est mis de côté et une nouvelle convergence peut commencer.

3.3.3.3. A33 : Formalisation finale (figure 76)

La formalisation finale est le résultat définitif de la convergence. C'est sur la base de cette formalisation que s'appuiera l'ensemble de la phase de conception suivante ou la suite de la phase.

Le processus de convergence se termine par une étape de formalisation finale. Cette formalisation est réalisée par le Concepteur Mécanicien et se veut technique, afin de lui permettre, en tant que chef de projet, d'assurer le suivi du projet de conception dans son intégralité. Dans ce contexte, l'usage d'outils de visualisation communs à tous les concepteurs peut s'avérer utile afin de valider cette formalisation finale. Dans le cadre des premières applications, nous avons en particulier observé la pertinence des systèmes de revue de projet tels que la plateforme collaborative Visioconcept. Cette plateforme est constituée d'un écran de 2,4m x 1,8m sur lequel est projetée par l'arrière, une image du logiciel CAO CATIA V5, en stéréoscopie passive. Ainsi, tous les concepteurs peuvent visualiser en 3D un modèle numérique et le faire évoluer afin de valider les solutions techniques retenues (tel que le montre la figure 78).

Figure 78 : Revue de projet « Banc Sirocco » sur la plateforme collaborative Visioconcept

Nous noterons que cette formalisation finale est souvent appelée « formalisation intermédiaire » dans le processus de conception. C'est elle qui permet de valider une phase et de passer à la phase suivante (cf. §3.1.1 page 113). Selon l'étape concernée, cette formalisation se caractérise sous la forme de fonctions, de solutions (conceptuelles ou détaillées), de prototypes (fonctionnels ou non) ou encore de produit (présérie, série, etc.).

4. Conclusions et discussions

Les convergences sont les phases du processus de conception durant lesquelles les décisions sont prises. En effet, c'est durant ces phases que des options sont choisies et d'autres abandonnées. Malheureusement, si ces convergences ne sont pas encadrées par une méthodologie permettant à chaque concepteur de jouer son rôle (définition d'objectifs, recherche puis la validation de solutions) alors les choix pris risquent de l'être dans de mauvaises conditions. La solution obtenue ne serait donc pas la meilleure qui.

Pour rappel, la méthodologie développée devait répondre aux différents objectifs suivant :

- Obj1. S'adapter à différents types de convergence, c'est-à-dire que la méthodologie proposée doit rester applicable durant les différentes phases d'un projet de conception. Dans un premier temps, nous appliquons cette méthodologie aux convergences entre les métiers d'ergonome, de designer industriel et de concepteur mécanicien.
- Obj2. Permettre à chacun des métiers d'interagir avec l'objet conçu au travers des Formalisations intermédiaires, en conservant leurs propres approches et les méthodes et outils associés. Cela passe par le développement d'outils nouveaux et spécifiques, adaptés à ces approches multidisciplinaires.
- Obj3. Développer des outils pour le concepteur mécanicien, afin de lui permettre de garantir une bonne convergence.
- Obj4. Exploiter l'ensemble des Formalisations intermédiaires de chaque métier comme support supplémentaire d'aide à la convergence.

4.1. Première formalisation du processus de convergence

Comme nous l'avons évoqué, la méthodologie proposée se base sur une première formalisation du processus de convergence. Cette formalisation s'appuie sur une littérature encore rare dans le domaine de la convergence en conception.

De nombreux travaux introduisent cette notion de convergence [ASIM 1962] [VAN 2001] [BUXT 2007], mais sans la définir réellement. C'est dans le but de formaliser le processus de convergence, et en particulier le processus de convergence multidisciplinaire, que nous avons orienté cette première approche méthodologique. Il en résulte donc un modèle prescriptif basé sur une définition d'un ensemble de caractéristiques (attributs produit, processus, métier, mais aussi objectifs de convergence et outils/méthodes pertinentes). Les modalités de définition de ces caractéristiques restent à approfondir dans le cadre du développement et de la mise en œuvre de cette méthodologie.

Néanmoins, la méthodologie présentée reste applicable à l'ensemble des convergences du processus de conception, de la définition des fonctions d'un cahier des charges, à la convergence vers un prototype ou un produit industrialisable. Ainsi, nous atteignons notre objectif Obj1.

4.2. Vers une convergence multidisciplinaire adaptée à chacun des concepteurs

Le processus de convergence est sensible car il engendre des prises de décision sur la conception du produit, et ce selon toutes ses composantes (les aspects, mais aussi les métiers engagés). Nous avons pu mettre en évidence le fait que tout au long du processus de convergence, chacun des concepteurs joue un rôle important. En effet, même si l'objet d'une convergence ne concerne pas l'un des concepteurs, il est possible que les évolutions du produit impacte des éléments le concernant. C'est pourquoi tous les concepteurs doivent pouvoir avoir une place dans le processus de convergence, quelque soit son objet, et chacun doit pouvoir mettre en œuvre ses propres méthodes et outils d'aide à la prise de décision. Dans ce sens, la réalité virtuelle joue un rôle prédominant car elle offre une flexibilité suffisante pour permettre à chaque concepteur d'utiliser les méthodes et outils propres à sa discipline. Ainsi, nous validons les objectifs Obj2 et Obj4 indiquant que chaque métier devait pouvoir intervenir en utilisant ses formalisations, ses méthodes et ses outils.

D'autre part, nous avons souligné les difficultés engendrées par les différentes itérations parfois nombreuses. L'idée de développer des méthodes et des outils permettant une évolution simultanée du produit permet de limiter le nombre de ces itérations. Dans ce contexte, les outils développés à l'aide des technologies de réalité virtuelle et similaires, permettent de limiter les itérations au travers d'une co-conception en temps réel pilotée par le concepteur mécanicien, garant d'une bonne convergence. Nous atteignons donc l'objectif Obj3 selon lequel un concepteur mécanicien devait disposer de méthodes et d'outils afin de faciliter les convergences multidisciplinaires.

4.3. Vers une convergence intégrée

Les perspectives des travaux méthodologiques conduits nous mènent à penser qu'il peut être important de prendre en compte les différentes phases de convergence dès le début du processus de conception. Ces phases impliquent souvent des choix difficiles, et toute anticipation permet de mieux converger. Ainsi, le fait de commencer à penser à la convergence dès les phases de divergence permettrait de mieux les préparer. Cela peut impliquer un frein à la créativité pour certains concepteurs (tels que les designers industriels), et c'est pourquoi il peut être intéressant de s'orienter vers ce que l'on peut appeler « convergence intégrée ».

La convergence intégrée pourrait être une prise en compte de la convergence durant la divergence, de manière à prévoir à l'avance les choix finaux à prendre. Ainsi, les méthodes et outils de validation pourraient par exemple être définis avant de définir les modes de formalisation. Cela permettrait de faciliter et d'accélérer les processus de préparation des convergences tout en garantissant un meilleur résultat.

CHAPITRE 6 :
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Dans le cadre des travaux présentés dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au processus de conception de produits mécaniques et à l'intégration de l'ergonomie et du design industriel. Nous avons pu mettre en évidence l'utilité de disposer de méthodologies adaptées à une conception multidisciplinaire afin de permettre aux équipes constituées notamment d'ergonomes, de designers industriels et de concepteurs mécaniciens, de proposer des produits toujours plus adaptés aux utilisateurs finaux.

Dans une **deuxième partie**, nous faisons un rappel des contributions méthodologiques de nos travaux ainsi que des différents résultats obtenus. Nous reviendrons sur chaque volet expérimental et leurs apports respectifs.

Dans une **troisième partie**, nous avancerons différentes pistes de perspectives à conduire afin de compléter nos travaux et d'ouvrir la voie à de nouvelles recherches.

1. Contributions méthodologiques et résultats

1.1. Méthodologie globale de conception multidisciplinaire et premières expérimentations

Les premiers résultats de nos travaux de thèse se basent sur une première hypothèse selon laquelle une meilleure intégration de l'expertise métier peut se faire par le biais d'une méthodologie multidisciplinaire de conception, qui intègre la spécificité de chaque métier concerné. Cette méthodologie doit faire apparaître les échanges interdisciplinaires tout au long du processus de conception.

Selon cette hypothèse, et en accord avec l'état de la littérature présenté dans notre chapitre 2, nous avons mis en évidence la nécessité de création d'une méthodologie répondant à notre problématique d'intégration de l'ergonomie et du design industriel dans le processus de conception mécanique. Pour cela, un nouveau modèle a été proposé. Ce modèle se propose de confronter les démarches en conception des ergonomes et des designers industriels, et de structurer ces éléments autour d'un processus central de conception mécanique.

Au cours d'une première expérimentation, nous avons mis à l'épreuve le modèle proposé en avançant une première hypothèse d'étude selon laquelle **la prise en compte des spécificités de l'ergonomie et du design industriel dans un processus unique, tend à faciliter l'intégration de chacun de ces métiers**. L'expérimentation a été réalisée dans le cadre du projet INTERREG IIIA, sur différents projets de conception de mobilier urbain.

Les résultats démontrent que notre modèle permet une conception structurée facilitant l'articulation des différents métiers autour du processus. Cette expérimentation met en évidence l'importance des notions de divergences et surtout de convergences, ainsi que le manque d'outils collaboratifs d'aide à la prise de décision. En effet, les confrontations de propositions sont sources de tension dans les projets de conception, et la recherche de compromis est difficile à la vue des différences d'enjeu d'un acteur à l'autre. Néanmoins, nous avons souligné l'existence de nombreuses interactions entre les acteurs de la conception et chaque interaction multidisciplinaire était source à la fois de créativité (car apportant plusieurs points de vue à un problème unique, donc plusieurs solutions possibles), mais aussi de difficulté de convergence.

C'est sur ce constat que nous avons avancé une deuxième hypothèse d'étude, ciblant plus spécifiquement les interactions multidisciplinaires, et considérant qu'**une meilleure connaissance de ces interactions permettait de limiter voire de réduire les difficultés de collaboration dans un projet de conception**. Notre deuxième expérimentation s'est donc orientée sur les échanges entre les acteurs de la conception. Les résultats obtenus ont mis en évidence les compromis souvent difficiles, existant notamment dans les phases de convergence. En effet, chaque concepteur met en avant des aspects du problème de conception et avance des solutions à ces problèmes. Les confrontations de ces différentes approches nécessitent alors un arbitrage du chef de projet.

Nous avons pu ainsi valider que les méthodologies de conception devaient intégrer la diversité des équipes projets, et que les phases de convergence nécessitaient en particulier des moyens supplémentaires en termes d'outils et de méthodes pour aider à la collaboration. Ces outils et méthodes ont pour objectif de résoudre les problèmes rencontrés par les concepteurs, et notamment les incohérences, les incompatibilités, et les incompréhensions entre les différentes formalisations qu'ils proposent.

Cette première approche nous a permis d'implémenter notre modèle initial, en y faisant apparaître toutes les interactions observées, et en soulignant le manque évident d'outils d'aide à la convergence multidisciplinaire.

1.2. La réalité virtuelle comme support de la convergence multidisciplinaire

Sur la base des résultats du premier volet expérimental de nos travaux, portant sur l'aspect méthodologique de notre sujet, nous avons défini une deuxième hypothèse de recherche selon laquelle de nouveaux outils de Formalisation Intermédiaire, notamment basés sur les technologies de Réalité Virtuelle, permettait une meilleure gestion des phases de convergences entre l'ergonomie, le design industriel et la conception mécanique.

Pour rappel, les Formalisations Intermédiaires sont définies comme des moyens permettant d'assurer le lien entre plusieurs acteurs et plusieurs phases de la conception. Elles se veulent un moyen de **représentation**, de **traduction** et de **médiation** [PASC 2006].

Au travers d'une première hypothèse d'étude, nous nous sommes proposé de positionner la **réalité virtuelle comme un outil support de Représentations Intermédiaires.** L'enjeu est d'enrichir notre approche avec de nouvelles technologies permettant selon nous de faciliter les phases de convergence multidisciplinaire. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur un projet expérimental de conception du véhicule F-City, afin de mettre à l'épreuve notre hypothèse. Deux sujets expérimentaux de convergence mécanique-ergonomie et mécanique-design industriel, nous ont permis de souligner l'intérêt de la Réalité Virtuelle comme support de Formalisation Intermédiaire. En effet, la flexibilité d'affichage du modèle 3D en réalité virtuelle permet une représentation que l'on pourrait définir comme « universelle », c'est-à-dire qu'un même modèle peut se représenter successivement selon les points de vue de chacun des acteurs du projet, quelque soit leur domaine d'expertise. L'avantage que donne la Réalité Virtuelle sur les autres technologies est qu'elle est à la fois :

- **Flexible** à la manière d'un outil CAO, permettant une modification en temps réel du modèle,
- **Réaliste**, à la manière d'un prototype, permettant de simuler une situation d'usage,
- **Collaborative**, permettant de concevoir à plusieurs dans un même espace.

Sur la base de ces premiers résultats, nous avons validé notre hypothèse d'étude selon laquelle la Réalité Virtuelle est un outil pertinent d'aide à la convergence. Nous avons souligné le fait que, **lors de certains cas de convergence, la Réalité Virtuelle permet aux différents acteurs de la conception de mettre en commun leurs travaux dans des conditions permettant une convergence améliorée. Toutefois, la pertinence de cet outil n'est pas systématique.**

Néanmoins, nous avons aussi pu mettre en lumière que la Réalité Virtuelle ne pouvait pas satisfaire l'ensemble des besoins que rencontrent les concepteurs lors des phases de convergence,

ainsi que le manque global en termes de support méthodologique de ces convergences multidisciplinaires.

1.3. Méthodologie de Convergence Multidisciplinaire assistée par la RV

Les deux volets expérimentaux portant sur la méthodologie multidisciplinaire et sur les outils d'aide à la convergence nous ont amené au constat que les équipes de conception manquent d'un support méthodologique spécifique aux phases de convergences. Sur la base de cette observation, nous avons défini une procédure de convergence multidisciplinaire dont le but est de pouvoir s'adapter aux différents types de convergence ainsi qu'à différents métiers concernés par cette convergence.

La méthodologie globale de conception multidisciplinaire développée dans le premier chapitre a mis en évidence un manque en termes de méthodes et d'outils d'aide à la convergence. Le positionnement de la réalité virtuelle comme support d'aide à la convergence est un premier pas pertinent, mais ne permet pas de traiter le problème dans son ensemble.

La procédure de convergence proposée s'inscrit dans un processus composé de trois phases : la divergence, la transformation et la convergence [ASIM 1962]. La phase de transformation jouant un rôle prédominant, nous avons choisi de l'intégrer dans notre processus de convergence. Ce processus se base sur trois étapes fondamentales dont la représentation est rappelée sur la figure 79 :

- la **préparation**, durant laquelle toutes les formalisations issues des divergences sont transformées afin d'être exploitables pour chacun des concepteurs.
- la **réalisation**, durant laquelle des confrontations sont opérées entre les différentes propositions. Il s'agit du cœur de la convergence.
- la **validation**, qui correspond à la phase de prise de décision. Une évaluation est conduite par chacun des concepteurs selon leurs propres critères, et tous ensembles se mettent en accord sur une décision validée par le chef de projet.

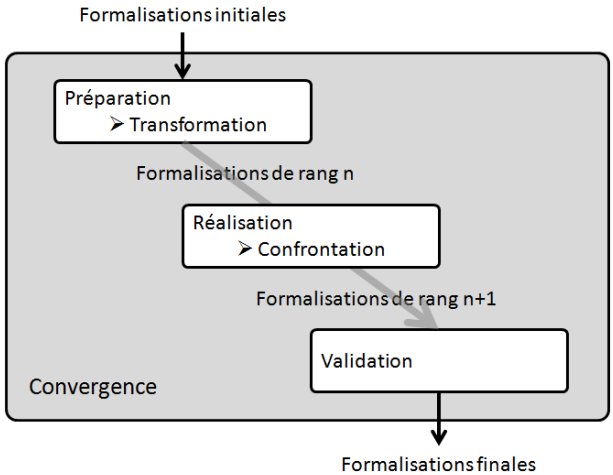


Figure 79 : Rappel des étapes du processus de convergence

Dans un deuxième temps, nous avons détaillé la convergence, en introduisant notamment une typologie des résultats de confrontations. Cette formalisation, applicable *a priori* à l'ensemble des phases de convergence du processus de conception (de la définition du cahier des charges jusqu'à la

formalisation du prototype final), permet de préparer dans les meilleures conditions les convergences multidisciplinaires souvent difficiles à traiter.

Dans un troisième temps, nous avons précisé les différentes étapes du processus de convergence. Nous avons souhaité en particulier mettre l'accent sur l'étape de préparation, primordiale pour une bonne convergence. Pour cela, nous proposons de développer la préparation en une première étape de définition des attributs impactant la convergence (en termes de métier, produit et processus). Ces attributs permettent de définir précisément le type de convergence à traiter. Cette étape est suivie d'une cartographie des différents outils d'aide à la convergence, afin de mettre à disposition des concepteurs les outils les plus adaptés au type de convergence identifié. Cette cartographie se base sur une capitalisation d'expérience des quatre convergences multidisciplinaires étudiées (E-CM, DI-CM, E-DI, E-DI-CM). Pour chacune, des catégories d'outils sont classifiés selon leur dimension (2D ou 3D) et selon le type de support (physique ou numérique), le tout réparti sur chaque phase du processus de conception.

2. Perspectives et discussions

2.1. Approfondissement et généralisation des travaux

La méthodologie de conception multidisciplinaire, ainsi que la procédure de convergence, présentées dans les chapitres 3 et 5, visent à permettre une meilleure intégration de l'ergonomie et du design industriel dans le processus de conception mécanique.

Nous pensons que nos travaux doivent être approfondis et généralisés, notamment en ce qui concerne les modèles proposés. Cette généralisation passe par une application de ces méthodologies à de multiples projets de conception, dans lesquels différents métiers et surtout différents cas de convergences apparaissent. En effet, même si l'ensemble des convergences du processus de conception peut être uniformisé, chacune n'est pas traitée de la même manière selon le contexte existant.

Concernant la méthodologie de convergence proposée, l'étape de définition du problème de convergence reste à préciser et à expérimenter dans le cadre de projets de conception. Une première piste serait de considérer un problème de convergence comme un problème de conception, et d'appliquer une démarche complète de conception. Apparaitrait alors un cahier des charges de convergence, des recherches de solutions de convergence, une sélection des solutions les plus appropriées, et une validation de la procédure de convergence à appliquer.

Cette thématique de recherche, appliquée aux convergences Ergonomie-Conception Mécanique a donné lieu à une thèse au sein du laboratoire SET de l'IRTES-UTBM [Al KH 2011]. L'enjeu est d'étudier plus précisément la phase de réalisation de la convergence, sur la base des travaux déjà conduits.

De plus, une convergence que nous avons évoquée sans l'étudier de manière approfondie devra aussi être poursuivie dans de futurs travaux, il s'agit de la convergence Ergonomie-Design industriel. En effet, notre positionnement selon une approche du processus de conception de produits mécaniques, nous a poussés à nous intéresser aux convergences faisant intervenir le concepteur mécanicien. Or, il existe aussi des convergences entre l'ergonome et le designer industriel, notamment dans les phases amont du processus de conception. Cette convergence implique le développement d'outils spécifiques, pouvant intégrer le modèle de convergence que nous proposons. Le cas à d'ailleurs déjà été prévu, comme le rappelle la figure 71 page 127.

Enfin, une dernière perspective de nos travaux pourrait consister à étudier la variété des projets de conception et de sortir du positionnement que nous avons fixé, notamment en termes d'indépendance des métiers. En effet, dans un contexte industriel, les rôles ne sont jamais aussi clairs que dans les projets réalisés au cours de nos expérimentations. Ainsi, les convergences observées permettraient d'accroître l'importance de la cartographie des outils et de la rendre significative. En effet, la multiplication des contextes de convergence permettra d'implémenter cette cartographie en ajoutant des outils supplémentaires, mais aussi des critères impactant, qui pourront rendre le choix de ces outils plus précis.

Cette généralisation permettrait aux modèles présentés d'être exploitables dans différents secteurs d'activités et dans différents types de projets de conception, de la petite équipe d'une PME, à la grosse structure R&D d'une multinationale.

2.2. Vers un concepteur-coordinateur multi-métier

Afin de mieux répondre à des besoins de plus en plus complexes et interdépendants, les équipes de conception se doivent d'être multidisciplinaires. Ainsi, chaque co-concepteur peut intervenir pour apporter une vision différente du problème de conception, et des solutions complémentaires satisfaisant le problème initial. Pourtant, cette multidisciplinarité pose un problème qui est peu traité dans les différents modèles de conception et les méthodologies existantes, c'est le problème de coordination des métiers, en particulier lors des phases de convergence et de prises de décision. Au-delà d'une méthodologie multidisciplinaire, il est important d'avoir un chef d'orchestre qui soit capable de comprendre les problématiques de chaque métier, afin de garantir une bonne convergence. Dans notre positionnement, nous avons défini le concepteur mécanicien comme chef

d'orchestre, garant de la bonne convergence entre les métiers d'ergonomie, de design industriel et de conception mécanique. Ce rôle complémentaire représente une tâche souvent complexe à traiter, notamment lorsque le concepteur mécanicien est parti prenante dans une convergence.

La question de la création d'un rôle de concepteur indépendant, dédié à la coordination des métiers se pose alors. Sa mission serait d'accompagner les équipes de conception afin de les aider à mieux collaborer, notamment lors des phases de convergence. En plus d'aider lors des arbitrages nécessaires, ce « *concepteur-coordinateur* » apporterait une rigueur méthodologique, ce qui permettra à chaque concepteur d'approfondir leurs recherches de solution. Cette perspective engendre la nécessité de prévoir de nouveaux modes de management de projet.

2.3. Extension du cadre d'étude, convergence multidisciplinaire élargie

La méthodologie globale de conception multidisciplinaire, présentée dans le chapitre 3, se base sur une synchronisation d'approches propres à l'ergonomie et au design industriel, autour du processus de conception mécanique. Dans ce contexte, le concepteur mécanicien est chargé de l'intégration de l'ergonomie et du design industriel.

La méthodologie développée a volontairement été réduite à ce positionnement, mais nous sommes conscients que les réalités industrielles poussent les équipes projets à se structurer différemment selon les produits conçus et les contextes de conception. Ainsi, il est possible de formaliser notre modèle selon des approches différentes, en plaçant par exemple l'ergonome au centre du processus, comme représentant de l'utilisateur final, et fédérant les aspects esthétiques et commerciaux au travers de l'approche proposée par le designer industriel, et les aspects techniques apportés par le mécanicien (figure 80). Ce changement de positionnement peut aussi se faire au profit du design industriel, qui, une fois placé au centre du processus de conception, assure une intégration de la dimension humaine au travers de l'approche ergonomique, et une faisabilité technique grâce à l'approche mécanique (figure 81). Cette dernière formalisation est souvent utilisée dans les projets créatifs où la forte valeur ajoutée est apportée sur un plan innovation et originalité, plus que technique.

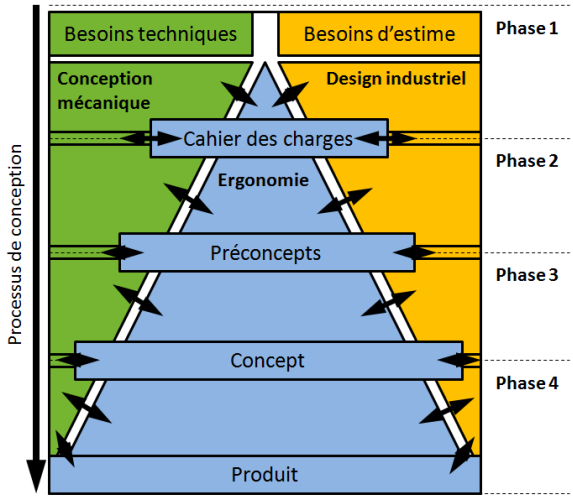


Figure 80 : Modèle centré sur l'ergonomie

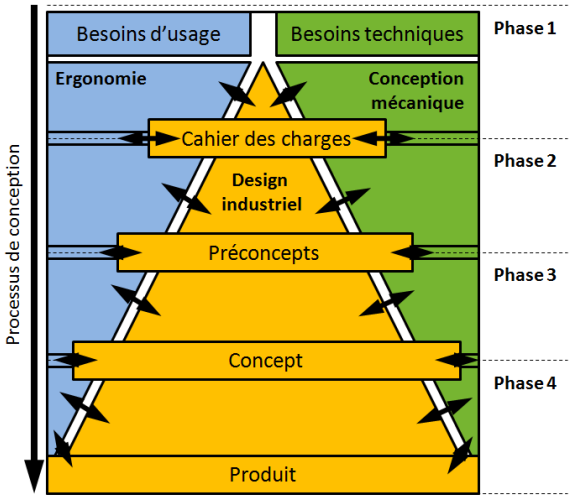


Figure 81 : Modèle centré sur le design industriel

Dans les trois configurations présentées, les métiers intervenant sont l'ergonomie, la conception mécanique et le design industriel, car ces métiers permettent la conception de produits mécaniques intégrant pleinement le facteur humain en termes d'usage et d'estime. Pour autant, la méthodologie multidisciplinaire de conception traite des moyens d'interaction entre les métiers tout au long du processus de conception, et pourrait être étendue à d'autres métiers dont l'articulation ou l'intégration peut poser problème. Cela peut être le cas par exemple de la conception de systèmes mécatroniques, où la part d'électronique ou d'automatisme peut s'avérer complexe à prendre en compte pour un mécanicien. Il serait aussi possible de sortir d'un contexte de conception mécanique et de s'orienter vers la conception de systèmes électroniques embarqués par exemple. En effet, elle fait intervenir à la fois des approches informatique et énergétique autour de la conception de systèmes électroniques, dont la problématique d'intégration reste similaire à la notre. Ainsi, une perspective de nos travaux est de les transposer à des convergences mettant en œuvre d'autres métiers.

En ce qui concerne les convergences Ergonomie – Design Industriel – Conception Mécanique, il sera nécessaire d'approfondir et de consolider la méthodologie et les outils associés, grâce à différentes expérimentations plus poussées et plus spécifiques. La recherche d'une nouvelle démarche méthodologique, dédiée en particulier à la création d'outils d'aide à la convergence assistés par la Réalité Virtuelle, pourra alors être déployée, afin de mettre à disposition des équipes de conception, de réels moyens performants de convergence et d'intégration de l'ergonomie et du design industriel dans le processus de conception de produits mécaniques.

BIBLIOGRAPHIE

1. Normes

[AFNOR 1982] NF X35-002. Modèles anthropométriques de la population masculine et féminine. 1982.

[AFNOR 1990] NF X50-150. Analyse de la valeur - analyse fonctionnelle. Vocabulaire. Août 1990.

[AFNOR 1991] Bancs publics. Caractéristiques de robustesse et de stabilité des bancs publics. Juin 1991.

[AFNOR 2007a] NF X 50-151. Management de la Valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel. Septembre 2007.

[AFNOR 2007b] NF X 50-152. Management de la Valeur - Caractéristiques fondamentales de l'Analyse de la Valeur. Septembre 2007.

[AFNOR 2009] NF X 50-153. Analyse de la Valeur - Recommandations pour sa mise en œuvre. Septembre 2009.

[ISO 9000:2005] Norme ISO 9000:2005. Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire, 30p. 2005.

[ISO 9241:1998] Norme ISO 9241:1998. Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation. 1998.

[ISO 15537:2004] Norme ISO 15537. Principes de choix et d'utilisation de sujets d'essai pour l'essai des aspects anthropométriques des produits industriels et leur conception. 2004.

2. Références bibliographiques

[ADLA 2007] Adla, A. [2007]. A Distributed architecture for Cooperative intelligent Decision Support Systems, *IEEE Multidisciplinary Engineering and Education Magazine (MEEM),* Vol.2, N° 2, pp.22-29.

[AFAV 1994] AFAV [1994]. Management et démarches de projet - Projet de guide d'intégration des démarches qualité dans la conception de produits. Association Française pour l'Analyse de la valeur, 1994.

[Al KH 2011] Al Khatib, A., Mahdjoub, M., Bluntzer, J.B., Sagot, J.C. [2011]. Intégration des règles métier ergonomique pour une conception de produits en environnement virtuel. *Actes du 18e Colloque CONFERE.* 30juin-1juillet 2011. Montbéliard, France.

[AOUS 1990] Aoussat, A. [1990]. *La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle.* Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Arts et Métiers. ParisTech.

[AOUS 1994] Aoussat, A., Christofol, H. & Le Coq, M. [1994]. Engineering Education - Management of Design Process. *2nd International Symposium in Engineering Education*, University of LIMERICK, IRELAND, October 28-31, 1994.

[ASIM 1962] Asimov, M. [1962]. *Introduction to Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

[BASS 1996] Bassereau J.F. [1996]. Cahier des Charges Qualitatif Design. *Bulletin international de micro psychologie et de psychologie sociale des communications.* December 1996, n°30.

[BAXT 1995] Baxter, M.R. [1995]. *Product design - Practical methods for the systematic development of new products*. Chapman & Hall, London. ISBN : 0748741976.

[BEGU 1997] Béguin, P. [1997]. L'activité de travail : facteur d'intégration durant les processus de conception In P Bossard, C Chanchevrier, & P Leclair (Eds), *Ingénierie concourante. De la technique au social* (pp 101-113) Paris : Economica.

[BEIT 1993] Beitz, W. [1993]. Designing for ease of recycling. General approach and industrial application. *The proceedings of the ninth international Conference of Engineering Design (ICED)*, The Hauge, The Netherlands, pp. 325-332.

[BENB 2006] Ben-Bassat, T., Meyer, J., Tractinsky, N. [2006]. Economic and Subjective Measures of the Perceived Value of Aesthetics and Usability. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol 13, No. 2, June 2006, pp 210-234.

[BENN 2012] Bennes, L. & Bazzaro, F. & Sagot, J.C. [2012]. Virtual Reality as a Support Tool for Ergonomic – Style Convergence: Multidisciplinary Interaction Design Methodology and Case Study. *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference,* Laval, 2012.

[BERG 1996] Bergquist, K., Abeysekera, J. [1996]. Quality Function Deployment (QFD) - A means for developing usable products. *International Journal of Industrial Ergonomics* 18 (1996) 269-275.

[BEST 2006] Best K, [2006]. *Design Management: Managing Design Strategy, Process and Implementation*, Ava Publishing. ISBN : 2-94037-312-4, 215p.

[BLAC 1999] Black, S. [1999]. The fashion and textile design process London College of Fashion, University of the Arts, London.

[BNAE 1999] Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. [1999]. *Recommandation générale pour la spécification de management de programme*. RG Aéro, 000 40°.

[BOOT 1992] Boothroyd, G. & Alting, L. [1992]. Design For Assembly ans Disassembly. *Keynote paper*, *Annals of the CIRP*, 41(2), pp625-636.

[BOSS 1997] Bossard, P., Chanchevrier, C., Leclair, P. [1997]. *Origine et définition de l'ingénierie concourante*, in L'ingénierie Concourante – de la technique au social, Editions economica, Paris.

[BORD 2006] Bordegoni, M., Colomboa, G. & Formentinia, L. [2006]. Haptic technologies for the conceptual and validation phases of product Design. *Computers & Graphics* 30. 377–390.

[BOUC 1997] Bouchard C. [1997]. *Modélisation du processus de design automobile. Méthode de veille stylistique au design du composant d'aspect*, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Arts et Métiers. ParisTech. (pp. 50-61).

[BOUC 1999] Bouchard C., Christofol H., Roussel B., Auvray L., Aoussat A. [1999]. Identification and Integration of Product Design Trends*, in proceding of International Conference on Engineering Design, ICED'99*, Munich, August 24-26.

[BOUJ 2003] Boujut, J-F., Blanco, E. [2003]. Intermediary objects as a means to foster co-operation. Actes de la conférence Engineering design, *Journal of computer supported collaborative work*, Vol. 12 Issue 2. 205-219.

[BOUT 2004] Boutigny, E. [2004]. Coopération dans l'entreprise et compétence collective, *AGRH, Actes du congrès*, Tome 3 La gestion des compétences.

[BRAN 1985] Branzi, A. [1985]. *Le Design Italien "La casa calda",* collection L'objet en question, Éditions de l'Équerre, Paris, ISBN : 2-86425-041-1.

[BRAN 2003] Brangier, E., Barcenilla, J. [2003]. *Concevoir un produit facile à utiliser : Adapter les technologies à l'homme*. Paris: Editions d'Organisation. 2003. 261p. ISBN: 2-7081-2900-7.

[BRAN 2010] Brangier, E. & Robert, J-M. [2010]. Manifeste pour l'ergonomie prospective : anticiper de futures activités humaines en vue de concevoir de nouveaux artéfacts. *In Proceedings of IHM 2010*, *International Conference Proceedings Series*, New-York: ACM, 2010, Luxembourg.

[BRET 2000] De La Bretesche, B. [2000]. *La méthode APTE, Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle*. Editions Pétrelle, Paris. ISBN : 2-84440-019-1.

[BROW 1998] Brown, S.L. [1998]. *Competing on the edge. Strategy as structured chaos*. Harvard Business Press. ISBN : 0875847544.

[BUXT 2007] Buxton, B. [2007]. *Sketching user experiences: getting the design right and the right design*. Morgan Kaufmann (March 30, 2007), 448 pages. ISBN : 0123740371.

[CAVA 1995] Cavailles, J. [1995]. *Méthodes de management de programme*, 2e édition, DGA-Teknea, 1995.

[CHAN 2005] Chang Y.C., Chuang M.C., Shen S.J., Chu B.S. & Hung S.H. [2005]. A Kansei study on style image of fashion design, *International Design Congress*.

[CHEU 2005] Cheutet, V., Catalanoa, C.E., Pernotc, J.P., Falcidienoa, B., Gianninia, F., & Leonb J.C. [2005]. 3D sketching for aesthetic design using fully free-form deformation features. *Computers & Graphics*, Volume 29, Issue 6, December 2005, Pages 916-930.

[CHEU 2007] Cheutet V. [2007]. 2D semantic sketcher for car aesthetic design. *5ième conférence internationale Conception et Production Intégrée (CPI07)*, Rabat - Maroc, 22-24 Octobre.

[CHIT 2003] Chitescu, C., Galland, S., Gomes, S. & Sagot, J.C. [2003]. Virtual Reality within a Human-centered Design Methodology. *In Virtual Reality International Conference*, Laval, France, May 2003.

[CHRI 2000] Christofol H, Bouchard C, Roussel B, & Aoussat A. [2000]. Analogue Reasoning a fundation of Stylistic, ergonomic and technologival creativity, in proceding of *3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'2000)*, Presses Internationales Polytechnique, Montréal, Canada 2000.

[CHRI 2003] Christofol, H., Robert, T., Richir, S., & Bineau, S. [2003]. Les « produits concept », objets fédérateurs pour la mise en place d'une organisation de Recherche Innovation et Développement, *actes du 10ième Séminaire CONFERE*, 3-4 Juillet 2003, Belfort – France, pp. 43-50.

[CLAR 1988] Clarke, L., [1988]. Organizational Sociology. Pp. 138-159 in *The Future of Sociology*, Edited by Edgar F. Borgatta and Karen S. Cook, Beverly Hills: Sage Publications.

[CLAR 2005] Clarkson, P.J. & Eckert, C.M. [2005]. *Design process improvement - a review of current practice*, Ed. Springer. ISBN : 1-8523-3701X.

[CLER 2000] Cléro, J.P. [2000]. *Théorie de la perception, de l'espace à l'émotion*, Paris, PUF, coll. « L'interrogation philosophique », 320 p. ISBN : 2-1305-0695X.

[CNISF 2007] CNISF, Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France [2007]. *Situation en France des ingénieurs mécaniciens*. Seconde édition. Mars 2007.

[CRUZ 1993] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti. [1993]. Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the cave. *In Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '93*, pages 135–142, New York, NY, USA, 1993. ACM.

[DAI 2002] Dai, K., Wang, Y., Zhang, S. & Zhang, J. [2002]. Research on DFx Evaluation System for Distributed Design Based on Multi-Agent. *IEEE Proceedings of the 2nd lnternational Workshop on Autonomous Decentralized System*. 2002.

[DANI 2004] Daniellou, F. [2004]. L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. In P. Falzon (Ed.) *Traité d'ergonomie*. Paris : PUF.

[DARS 1997] Darses, F. [1997]. L'ingénierie concourante : un modèle en meilleure adéquation avec les processus de conception, in Bossard P, Chanchevrier C, Leclair P, *L'ingénierie Concourante – de la technique au social*, Editions economica , Paris 1997.

[DARS 2002] Darsess, F. & Falzon, P. [2002]. La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive. *Séminaire du GDR CNRS FROG "Coopération et Conception"*, Toulouse, 1er - 2 décembre 2002.

[DESI 2007] Design Council [2007]. Eleven lessons: managing design in eleven global companies, *Desk research report*. Issue Date 5 November 2007.

[DESS 2002] Dessus, P. [2002]. Description et prescription dans les méthodes de recherche en éducation. In J.-F. Marcel (Ed.), *Les sciences de l'éducation, des recherches, une discipline*. Paris : L'Harmattan.

[DIET 2000] Dieter, G.E. [2000]. *Engineering design - A materials and processing approach*. 3rd ed, Mc Graw-Hill International Editions.

[DUCH 1988] Duchamp, R. [1988]. *La conception de produits nouveaux*. Editions HERMES, Paris, 60p. ISBN : 2-8660-1165-1.

[DUCH 1991] Duchamp R, Bassereau J.F. & Cailleaux A.M. [1991]. Méthodologie pour l'élaboration d'un cahier des charges qualitatif à l'usage des designers et des responsables de produits, *Ministère de la recherche et de la technologie*, Paris, FRANCE.

[DUCH 1999] Duchamp, R. [1999]. *Méthode de conception de produits nouveaux*. Paris: Hermès Science Publications. 1999. ISBN: 2-7462-0045-7.

[ERIC 1999] Ericsson, K. A. [1999]. Expertise. In R. A. Wilson & F. C. Keil (Eds.), *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences* (pp. 298– 300). Cambridge, MA: MIT Press.

[FANC 1994] Fanchon, J.L. [1994]. *Guide des sciences et technologies industrielles*, AFNOR-Nathan, 1994.

[FIND 2006] Findeli, A. [2006]. Qu'appelle-t-on « théorie » en design ? Réflexions sur l'enseignement et la recherche en design. In Flamand, B. *Le design, Essais sur des théories et des pratiques*. Institut français de la mode – Regard Chap. II : Des théories à l'épreuve des pratiques, pp. 77-97.

[FISH 2004] Fischer, X. et Troussier, N. [2004]. La réalité virtuelle pour une conception centre sur l'utilisateur. *Mécaniques et industries* 5, 2004, pp.147-159.

[FUCH 1996] Fuchs. P. [1996]. *Les interfaces de la réalité virtuelle.* Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1996.

[GATE 1998] Gaté, J.C. [1998]. *Le design de (A) à (Z)*. Publié par la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services.

[GOME 2002] Gomes S., Sagot J-C. [2002]. A concurrent engineering experience based on a cooperative and object oriented design methodology, *3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Kluwer Academics Publisher, p. 11-18.

[GOTT 2005] Gotteland, D. [2005]. *Développer un nouveau produit, méthodes et outils*. Pearson Education, Paris. ISBN : 2-7440-7121-8.

[GRAN 1988] Grandjean, E. [1988]. *Fitting the Task to the Man: an ergonomic approach*, 1988.

[GRON 2004] Gronier, G., Sagot, J.C. [2004]. Coopération à distance en conception de produits : analyse de l'usage d'un collecticiel. *XIIIème Congrès de psychologie du Travail et des organisations : La qualité de la vie au travail dans les années 2000*. Association Internationale de Psychologie du Travail de Langue Française, Bologne (Italie), 6p.

[GRON 2006] Gronier, G. [2006]. Psychologie ergonomique du travail collectif assisté par ordinateur: l'utilisation du collecticiel dans les projets de conception de produits. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, en partenariat avec l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[GUER 2009] Guerlesquin G. & Sagot, J.C. [2009] Vers une meilleure intégration de l'ergonomie et du design industriel dans la conception. *6ème Conférence Internationale Conception et Production Intégrées*. Fès (Morocco), October 2009.

[GUID 1997] Guidat, C. [1997]. Sciences de l'innovation. Positionnement de la discipline. Orientation de développement. *Dossier M.S.T.*, ENSGSI-INPL, Nancy, 32p.

[HANN 2012] Hannah, R., Joshi, S. & Summers, J.D. [2012]. A user study of interpretability of engineering design representations, *Journal of Engineering Design*, 23:6, 443-468, 2012.

[HIGH 2004] Highsmith, J. [2004]. *Agile Project Management*, Addison Wesley, New Jersey, USA, 2004.

[HINT 2002] Hinterhuber, H.H., Friedrich, S.A. [2002]. The technology dimension of strategic leadership: The leadership challenge for production economists. *International Journal of Production Economics* 77 (2002) 191–203.

[HOWA 2008] Howard T.J., Culley 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.

[HUAN 1997] Huang, G.Q., Mak, K.L. [1997]. The DFX Shell: a generic framework for developing design for X tools. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, pp. 271-280.

[HUGI 2003] Husig and Kohn [2003], Factors influencing the Front End of the Innovation Process: A comprehensive Review of Selected empirical NPD and explorative FFE Studies, Brusell, Juni 2003, p.14.

[IEA 2012] Iea.cc [en ligne]. International Ergonomics Association [consulté le 1 mars 2012]. *What is Ergonomics?* Disponible sur : http://www.iea.cc/01_what/What%20is%20Ergonomics.html.

[IKEA 2006] IKEA, & Ministère de l'Industrie [En ligne]. *Des produits au design démocratique – 6. La valeur d'estime*. Juin 2006. Disponible sur : http://www.ikea.com/ms/fr_FR/about_ikea/cerpet2/P/P_0.pdf.

[JEAN 1995] Jeantet, A. & Vinck, D. [1995]. Mediating and commissioning objects in the sociotechnical process of product design: a conceptual approach, pp. 111-129, in MacLean, D., Saviotti, P., Vinck, D., *Management and new technology: design, networks and strategies*, Cost A3, Vol.2, Bruxelles 1995.

[JENK 2010] Jenkins N. [2010]. A Project Management Primer: Basic Principles - Scope Triangle. *Project Smart 2000-2010*. 2p. http://www.projectsmart.co.uk.

[JORD 1998] Jordan, P.W. [1998]. Human factors for pleasure in product use. *Applied Ergonomics*. 1998. Vol. 29, No. 1, pp 25-33.

[JORD 2000] Jordan, P.W. [2000]. *An Introduction to Usability*. Taylor & Francis Ltd. ISBN : 0-7484-07626.

[JORD 2003] Jordan, P.W. [2003]. *Designing pleasurable products, an introduction to the new human factors*. Taylor & Francis. 2000. ISBN: 0-415-29887-3.

[KADR 2004] Kadri, A., Christofol, H. & Samier, H. [2004]. Virtual Reality Application for Collaborative Design Evaluation: Virtual Dustbin Design, *Proceedings of International Conference on Virtual Reality (VRIC)*, Laval, 2004. pp. 119-127.

[KAUF 2009] Kaufman, J.J. [2009]. *Value Management: Creating Competitive Advantage*. Sakura House Publishing. ISBN 0-9809-2281X. 102 pages.

[KATT 2006] Kattan, A., Truchot, P. & Roussel, B. [2006]. La réalité virtuelle au service des designers, application à l'objet architectural. *Actes du 13^{e} colloque CONFERE*, Marrakech, Maroc.

[KOEN 2001] Koen et al. [2001], Providing clarity and a common language to the 'fuzzy front end'. *Research Technology Management*, 44 (2), pp.46-55.

[KOEN 2002] Koen et al. [2002]. Fuzzy Front End: Effective Methods, Tools, and Techniques, In P.Belliveau, A Griffen and S.Sorermeyer, ads. *PDMA Toolbook for New Product Development*. New York: Jonh Wiley and Sons, 2-35, 2002.

[KRAU 2004] Krause, A. [2004]. Three-stage Conceptual Design Process Using Virtual Environments. *SCG'2004*, February 2-6, 2004, Plzen, Czech Republic. (Technische Universität Berlin).

[KVAN 2000] Kvan, T. [2000]. Collaborative design: what is it? *Automation in Construction* 9 (2000) 409-415.

[LATT 2006] Lattuf, J. [2006]. Aide au pilotage d'une démarche d'innovation en conception de produits : vers un cahier des charges « augmenté ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Arts et Métiers. ParisTech.

[LE CO 1993] Le Coq, M. & Bassereau, J.F. [1993]. Intégration des métiers en conception de produit, *4th Intertnational Congress of Industrial Systems Engineering*, Marseille, du 15 au 17 Décembre 1993.

[LEMA 2010] Lemarchand, C. [2010]. *Vous avez dit « recherche en design » ?* Mémoire de fin d'études sous la direction de M.H. Caraës, ENSCI-Les Ateliers, novembre 2010.

[LIM 2006] Lim, D., Bouchard, C. & Aoussat, A. [2006]. Iterative process of design and evaluation of icons for interactive TV menu. *Behaviour and information technology*. November 2006, Volume 25, Issue 6, Pp511-519.

[LOEW 1990] Loewy, R., [1990]. *La laideur se vend mal*. Editions Gallimard. ISBN : 2070720136, 414p.

[LONC 2003] Lonchampt P., Prudhomme G. and Brissaud D. [2003]. Assisting designers in evaluating proposed solutions throughout the design process, *Proceedings of ICED '03*, Stockholm, 2003.

[LORI 1997] Lorino, P. [1997]. *Méthodes et Pratiques de la Performance*. Editions d'Organisation, 1997.

[LOUP 2010] Loup-Escande, E. [2010]. *Vers une conception centrée sur l'utilité : une analyse de la co-construction participative et continue des besoins dans le contexte des technologies émergentes*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences d'Angers.

[MACK 1995] Mack, M. [1995]. L'organisation apprenante comme système de transformation de la connaissance en valeur, Revue Française de Gestion, septembre-octobre 1995, p.43-48.

[MACI 1989] Macinnis, D.J., Jaworski, B.J. [1989]. Information Processing from Advertisements: Toward an Integrative Framework. *Journal of Marketing*, 53, 1-23.

[MAHD 2007a] Mahdjoub, M., Gomes, S., Sagot, J.C. & Bluntzer, J.B. [2007]. Virtual Reality for a human-centered design methodology. *6th Eurosim (federation of European simulation societies) congress on modeling and simulation*. Ljubljana, Slovenia. September 9 - 13, 2007.

[MAHD 2007b] Mahdjoub, M. [2007]. *La réalité virtuelle pour une conception des systèmes mécaniques centrés sur l'utilisateur*, Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[MAHD 2010] Mahdjoub, M., Monticolo, D., Gomes, S. & Sagot, J.C. [2010]. A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment. *Computer-Aided Design*, Volume 42, Issue 5, May 2010, Pages 402–413.

[MAIE 2003] Maier, J.R.A., Fadel, G.M., [2003]. On the complexity of the designer-artifact-user system. *Procedings of ICED03*, Stockholm, 2003.

[MALL 1996] Mallein, P. & Delcambre, B. [1996]. La conception assistée par l'usage : concepts, processus, exemples. *Document du club Cautic*.

[MANT 2003] Mantelet F., Bouchard C. and Aoussat A. [2003]. Integration and optimization of Kansei engineering in the process of design of new products. *ADC Asian Design Conference*, Tsukuba, Japan.

[MANT 2005] Mantelet F., Bouchard C. and Aoussat A. [2005]. Analysis of the correlation between words and design elements for the generation of a Kansei engineering system. *IDC International Design Conference*, National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan.

[MARS 2002] Marsot, J. [2002]. Conception et Ergonomie : Méthodes et outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à mains. *INRS; Note scientifique et technique n°219*.

[MER 1995] Mer S., Jeantet A. et Tichkiewitch S. [1995]. Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication, in Caelen J. et Zreik K. (Ed.), *Le communicationnel pour concevoir*, Europia, 1995.

[MIDL 1998] Midler, C. [1998]. Evolution des modèles d'organisation et régulations économiques de la conception. *Problèmes économiques,* n°2.558, 4 mars 1998.

[MIDL 2004] Midler, C. [2004]. L'Auto qui n'existait pas : Management des projets et transformation de l'entreprise. Editions Dunod. ISBN : 2100485725.

[MINE 2003] Minel, S. [2003]. *Démarche de conception collaborative et proposition d'outils de transfert de données métier : Application à un produit mécanique "le siège d'automobile"*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Arts et Métiers. ParisTech.

[MOIS 1992] Moisdon, J-C., Weil, B. [1992]. Groupes transversaux et coordination technique dans la conception d'un nouveau véhicule, *Cahier de recherche du CGS - ENSMP*, juin 1992.

[NIEL 1994] Nielsen, J. [1994]. *Usability Engineering*, AP Professional, Cambridge, 1994.

[NAGA 1997] Nagamachi, M. [1997]. *Kansei Engineering: The Framework and Methods, in Kansei engineering 1*. MITSUO, N.n Editor, Kaibundo Publishing Co. Ltd.: Kure, Japan, p.1-9.

[NORM 1989] Norman, D. [1989]. *The Design of Everyday Things*, Doubleday Currency, 1989. ISBN: 0-4650-6710-7.

[NORM 1996] Norman, D. [1996]. Grandeur et misère de la technologie, *La recherche*, n°285, Mars 1996, pp 22-25.

[NORM 2004] Norman, D.A. [2004]. *Emotional Design, why we love (or hate) everyday things*. Ed Basic Books. 2004. ISBN: 0-465-05135-9.

[OIRY 1995] Oiry, E. [1995]. Qualification et compétence : deux sœurs jumelles ?, *Revue française de gestion*, 2005/5 no 158, p. 13-34.

[PAHL 1996] Pahl, G. & Beitz W. [1996]. *Engineering Design: a systematic approach*, K. Wallace ed., Springer 88, 2nd edition 1996. ISBN: 1-8462-8318-3.

[PAPA 2010] Papalambros, P-Y. [2010]. The Human Dimension. *Journal of Mechanical Design*. Vol 132 (Editorial). May 2010.

[PARK 1999] Park, K.S., Lim, C.H. [1999]. A structured methodology for comparative evaluation of user interface designs using usability criteria and measures. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 23 (1999), 379-389.

[PARS 1993] Parsaei H.R. et Sullivan W.G., [1993]. Principles of concurrent engineering, Concurrent engineering contemporary issues and modern design tools, Chapman & Hall, 1993.

[PASC 2006] Pascal, A. & Thomas, C. [2006]. *Appropriation des TIC: vers une méthodologie de coconception orientée usage: le cas KMP*. Ouvrage collectif post-journée, Journée de Recherche: L'appropriation des outils de gestion : vers de nouvelles perspectives, Presses de l'Université de Saint Etienne. 2006.

[PATE 2010] Paternotte, J. [2010]. Design Industriel et métiers connexes : s'associer pour innover. *ATHENA : Recherche et développement technologique*. Numéro 261. Mai 2010. pp11-13.

[PETI 1991] Petitdemange, C. [1991]. *La maîtrise de la valeur : la gestion de projet et l'ingénierie simultanée*. Ed Association Française de Normalisation (AFNOR). ISBN : 2124750216.

[PERR 2001a] Perrin, J. [2001]. Concevoir l'innovation industrielle – méthodologie de conception de l'innovation, CNRS Edition, Paris 2001.

[PERR 2001b] Perrin, J. [2001]. Analyse de la valeur et valeur économique des biens et services. *Revue Française de Gestion Industrielle*, Vol. 20, N°2.

[PILE 2007] Pilemalm, S., Lindell, P.O., Hallberg, N., Eriksson, H. [2007]. Integrating the Rational Unified Process and participatory design for development of socio-technical systems: a user participative approach. *Design Studies* Vol 28 No. 3 May 2007.

[PIPE 2007] Pipe, A. [2007]. *Drawing for designers*. Laurence King Publishing Ltd. 2007, 224p. ISBN: 1-85669-533-6.

[PLUT 1980] Plutchik, Robert [1980]. Emotion: Theory, research, and experience: Vol. 1. Theories of emotion, 1, New York: Academic.

[PRUD 1999] Prudhomme, G. [1999]. Le processus de conception de systèmes mécaniques et son enseignement – La transposition didactique comme outil d'une analyse épistémologique. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 1999.

[PRUD 2003] Prudhomme G., Zwolinski P. et Brissaud D. [2003]. Integrating into the design process the needs of those involved in the product life cycle. *Journal of Engineering Design*, 14, 3, 333-353, 2003.

[PUGH 1990] Pugh, S. [1990]. Total design: Integrated methods for successful products engineering. Addison-Wesley. P. 75.

[QUAR 2001] Quarante, D. [2001]. *Eléments de design industriel*. 3e édition. Paris: Polytechnica. 2001. ISBN: 2-84054-018-5.

[RASH 2004] Rashid, A., Mac Donald, B.J., Hashmi, M.S.J. [2004]. Evaluation of the aesthetics of products and integration of the findings in a proposed intelligent design system. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004), pp 380-385.

[RAY 1985] Ray, M [1985]. *Elements of design engineering*. Prentice-Hall International, UK.

[SAAD 2000] Saadoun M., [2000]. *Technologies de l'information et du management*, Hermès Sciences publications, Paris 2000.

[SAGO 1996] Sagot J.C. [1996]. Améliorer simultanément les moyens de production et les conditions de travail : l'ergonomie. *La Technique Moderne*, n°6-7, 7-12.

[SAGO 1999] Sagot, J.C. [1999]. *Ergonomie et conception anthropocentrée*. Document pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, 267p.

[SAGO 2003] Sagot, J.C., Gouin, V., & Gomes, S. [2003]. Ergonomics in product design: safety factor, *Safety Science*, 2003. 41(2-3), 137-154.

[SAGO 2005] Sagot, J-C., Mahdjoub, M., Gomes, S. [2005]. Concevoir la fonction d'usage à travers l'ergonomie. *Actes du colloque : « le design en question(s) »*, Centre Pompidou, novembre 2005.

[SAGO 2008] Sagot, J-C., Mignot, B. [2008]. Rapport d'étude - Projet Interreg IIIA « L'ergonomie et le design dans la ville, pour un espace de vie pour tous ». Collaboration Franco-Suisse UTBM & HE-ARC. 63p.

[SCAR 2004] Scaravetti, D., Nadeau, J.P., Sebastian, P. & Pailhes, J. [2004]. Aided decision-making for an embodiment design problem. Proceedings of 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bath, UK, April 5-7, 2004.

[SCHO 1983] Schön D.A., [1983]. *The reflexive practitioner: how professional think in action*, Ed. Basic books, ISBN : 0-465-068782, 1983.

[SCHU 2002] Schütte S., [2002]. *Designing Feelings into Products.* Integrating Kansei Engineering Methodology in Product Development, Linköping 2002.

[SCHU 2006] Schütte S., [2006]. Developing the Space of Product Properties Supporting Kansei Engineering Procedure, *Kansei Engineering International*, 2006, (5), 4, 11-19.

[SIMO 1973] Simon H. [1973]. The structure of ill-structured problems. *Artificial intelligence*, 4, 181-20, 1973.

[SHAD 2009] Shadmehri, N. [2009]. Méthode de conception prescriptive des produits afin de transmettre les valeurs humaines par le design de produit. Thèse de doctorat de l'Université d'Angers.

[SHAF 1712] Shaftesbury, A.A.C. [1712]. Lettre sur l'art et la science du dessin. *Discourse on the Arts of Painting, Sculpture, Etching, etc.* 1712.

[SOHL 1992] Sohlenius, G. [1992]. Concurrent Engineering, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 41, Issue 2, 1992, Pages 645-655.

[SUH 1990] Suh, N-P. [1990]. *The Principles of Design*, Oxford University Press, Inc. 401p. ISBN: 0-19-504345-6.

[TASS 2009] Tassoul, M. [2009]. *Creative Facilitation,* 3rd edition, Published by VSSD, Delft - NL. Electronic version ISBN-13 978-90-6562-203-3.

[TICH 1995] Tichkiewitch, S., Chapa Kasusky, E. & Belloy, P. [1995]. Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée, *Congrès international de Génie Industriel de Montréal - La productivité dans un monde sans frontières*, Vol. 3, p. 1989-1998.

[TICH 1998] Tichkiewitch, S. in Tollenaere, M. & al. [1998]. *Conception de produits mécaniques – méthodes, modèles et outils*, Editions Hermès, Paris 1998, pp.19-26.

[TOMA 2003] Tomala, F. & Senechal, O. [2003]. Innovation Management: A Synthesis of Academic and Industrial Points of View. *International Journal of Project Management*, 22: 281-287.10. 2003.

[TRUC 1997] Truchot, P. & Al. [1997]. L'approche pluridisciplinaire de la conception de produits: une science de l'innovation. *Deuxième congrès international Franco-Quebequois de Genie Industriel*. Albi, 11p.

[TRYB 1995] Trybula, W.J. [1995]. Development of Design for Manufacture. Dans les actes de la conférence IEEE1CPMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium. 1995.

[ULLM 1997] Ullman D.G., Herling D. and D'Ambrosio B., [1997]. What to do next: using problem status to determine the course of action, *Research in Engineering Design*, 9, 214-227, 1997.

[ULLM 2003] Ullman, D.G. [2003]. *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill Higher Education. 2003. ISBN: 0-07-237338-5.

[VAN 2001] Van Der Lugt R. [2001]. Developing brain sketching, a graphic tool for generating ideas. Idea Safari, *7th European Conference on Creativity and Innovation,* University of Twente, The Netherland.

[VINC 1996] Vinck, D., Jeantet, A., Laureillard, P. [1996]. Objects and Other Intermediaries in the Sociotechnical Process of Product Design: an exploratory approach, In The role of design in the shaping of technology, Perrin, J.& Vinck, D. (Eds), pp. 297-320, vol. 5, COST A4 Social Sciences, EC Directorate General Science R&D, Bruxelles.

[VISS 2002] Visser W. [2002]. A Tribute to SIMON, and Some - Too Late - Questions, by a Cognitive Ergonomist, *actes de la Conférence Internationale « Les Sciences de la Conception »*, Lyon, 2002.

[WANG 2002] Wang, G.G. [2002]. Definition and review of virtual prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, September 2002. Vol. 2(3), pp. 232-236.

[WEAV 2000] Weaver, J. [2000]. *Design for Ergonomics*. MPD575 DFX. 209p.

[WHEE 1992] Wheelwright, S.C., Clark, K. [1992]. Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency, and Quality. Free Press. ISBN : 0029055156.

[WILS 1980] Wilson, D., [1980]. *An exploratory study of complexity in axiomatic design*, Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1980.

[ZAIB 2006] Zaibet, O. [2006]. Collaboration dans l'entreprise et intelligence collective, La XVème conférence internationale de management stratégique de l'association internationale de management stratégique (AIMS), Annecy.

[ZEIL 2007] Zeiler W., Savanovic P., Quanjel E. [2007]. Design decision support for the conceptual phase of the design process. IASDR'07, *Conference by the International Association of Societies of Design Research*, Hong-Kong, November 2007.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique du rapport « connaissance du problème / liberté d'action » [ULLM 1997] 21
Figure 2 : Modèle de Divergence - Convergence [VAN 2001] 23
Figure 3 : Phases du processus de conception selon Suh [SUH 1990] 26
Figure 4 : Rencontres des disciplines carrefours [AOUS 1990] 31
Figure 5 : La conception de produit, une démarche pluridisciplinaire, selon Sagot [SAGO 2005] 34
Figure 6 : Management versus Leadership [HINT 2002] 37
Figure 7 : Implication des disciplines durant le processus de conception [PILE 2007] 38
Figure 8 : Modèle simplifié de conception et de développement de produits avec précision des étapes propres à la discipline de l'Ergonomie [SAGO 2003] 41
Figure 9 : Méthodologie de conception centrée sur l'homme traduisant l'articulation "Ergonomie – Conception", Selon Chitescu [CHIT 2003] en accord avec [DUCH 1988] 42
Figure 10 : Mazda Miata MX5, conçue selon l'ingénierie KANSEI 44
Figure 11. Représentation simplifiée de l'articulation Design industriel - Conception Mécanique [GUER 2009] 51
Figure 12 : Représentation simplifiée de l'approche globale du processus de conception [GUER 2009] 51
Figure 13. Méthodologie globale de conception multidisciplinaire [GUER 2009] 55
Figure 14 : Evaluation ergonomique des produits existants 58
Figure 15 : Profil d'assise préconisé par Grandjean [GRAN 1988] 58
Figure 16 : Exemple de planche de tendance « High Tech » 58
Figure 17 : Proposition numérique d'un profil d'assise par l'ergonome 59
Figure 18 : Croquis de principe du designer industriel 59
Figure 19 : formalisations du Banc Sirocco par chacun des métiers (maquette 1/5^{e} du designer industriel à gauche, modèle CAO du concepteur mécanicien au centre, mulet échelle 1 de l'ergonome à droite) 61
Figure 20 : Assemblage du prototype du Banc Sirocco 62
Figure 21 : Prototype final du Banc Sirocco 62
Figure 22. Illustration des étapes de conception d'un banc public [GUER 2009] 64
Figure 23 : Scénarios d'usage de la chaise longue Breva 68
Figure 24 : Exemple de préconcept de la Chaise Longue Breva 70
Figure 25 : Pré-modélisation du concept retenu et simulation de postures par un mannequin numérique 70
Figure 26 : Mulet fonctionnel en bois de la Chaise Longue 71
Figure 27 : Système de fixation "Bavette-Flasque-Traverse" 71
Figure 28 : Calcul de structure réalisé sous CATIA V5 pour la Chaise Longue Breva 71
Figure 29 : Prototype fonctionnel de la Chaise Longue Breva 72
Figure 30 : Caractérisation des interactions multidisciplinaires, Degré de liberté / Niveau de collaboration 75
Figure 31 : Modèle global de conception intégrant les interactions multidisciplinaires 76

Figure 32 : Banc Sirocco (produit référent) 78
Figure 33 : Banc Zéphyr (contrainte de production) 78
Figure 34 : Transfert du leadership au cours du projet de conception 78
Figure 35 : Différents types de convergences multidisciplinaires 80
Figure 36 : Modèle global de conception implémenté 81
Figure 37 : Exemple d'incohérence de formalisations lors du transfert de données d'un métier à l'autre, représenté selon la norme IDEF0 82
Figure 38 : Exemple d'incompatibilité de formalisations lors des phases de convergence, représenté selon la norme IDEF0 83
Figure 39 : Exemple d'incompréhension d'une formalisation lors des phases d'évaluation, représenté selon la norme IDEF0 84
Figure 40 : Véhicule F-City industrialisé par FAM 90
Figure 41 : Poste de conduite du Véhicule F-City équipé de l'Opus A3 Naviboard® et de l'Opus A5 Dashboard® 91
Figure 42 : F-City – Concepts de positionnement de l'Opus A3 92
Figure 43 : Evaluation de l'accessibilité des commandes sur plateforme de RV 93
Figure 44 : Industrialisation du concept N°5 94
Figure 45 : Proposition de configuration texture/couleur par les designers industriels 95
Figure 46 : Configurateur textures/couleurs/matériaux en Réalité Virtuelle 96
Figure 47 : visualisation comparative de plusieurs configurations de couleurs des sièges du véhicule F-City 97
Figure 48 : La Réalité Virtuelle comme outil support des Formalisations Intermédiaires 99
Figure 49 : Banc de test de cartes électronique commercialisé par l'entreprise A 100
Figure 50 : Analyse de l'activité sur le poste de test de carte électronique de l'entreprise A 101
Figure 51 : Planche de tendances et d'univers produit 102
Figure 52 : Planche de présentation produit 103
Figure 53 : Revue de projet lors de la phase d'évaluation des avant-projets 104
Figure 54 : Evolution du niveau de validations partielles de chacun des aspects du produit conçu, selon les phases du processus de conception 107
Figure 55 : Différents types d'itérations dans un processus de convergence 108
Figure 56 : Divergences, transformations et convergences dans le processus de conception 114
Figure 57 : Trois phases du processus de convergence 115
Figure 58 : Formalisation des étapes du processus de convergence 116
Figure 59 : Formalisation du processus de convergence 117
Figure 60 : Représentation de l'accord parfait en convergence 117
Figure 61 : Représentation de l'accord partiel en convergence 118
Figure 62 : Représentation de l'arbitrage en convergence 118
Figure 63 : A0 – Méthodologie de convergence en conception, représentée selon la norme IDEF0 119
Figure 64 : A1 - Phase de préparation de la convergence, représentée selon la norme IDEF0 120
Figure 65 : Attributs relatifs au processus de conception 121

Figure 66 : Attributs relatifs aux métiers 122
Figure 67 : Attributs relatifs au produit 123
Figure 68 : Triptyque M2P – Métier-Produit-Processus 123
Figure 69 : Exemple de répartitions de supports 124
Figure 70 : Diagramme bâton des différents types de supports (nu = numérique ; ph = physique) 125
Figure 71 : Cartographie des outils selon les types de convergence et les phases du projet de conception 127
Figures 72 : Formalisations initiales – Convergence DI-CM en phase 3 de développement 128
Figure 73 : A2 - Phase de réalisation de la convergence, représentée selon la norme IDEF0 129
Figures 74 : Configurateur Matériau-Texture-Couleur 130
Figure 75 : Réalité Augmentée – formalisation numérique et physique de deux solutions à l'échelle 1/5^{e} 131
Figure 76 : A3 - Phase de validation de la convergence, représentée selon la norme IDEF0 131
Figure 77 : Validation numérique en temps réel 132
Figure 78 : Revue de projet « Banc Sirocco » sur la plateforme collaborative Visioconcept 133
Figure 79 : Rappel des étapes du processus de convergence 141
Figure 80 : Modèle centré sur l'ergonomie 145
Figure 81 : Modèle centré sur le design industriel 145