

École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques
Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Université de Franche-Comté

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD
ET DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMPTÉ**

Spécialité : SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR
Discipline : GENIE MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

Analyse d'activités de conception : contribution à la traçabilité des intentions de conception dans les modèles CAO

Par
Gilbert KUATE

Soutenue le 15 décembre 2006

Devant un jury composé de :

Rapporteurs : NOEL Frédéric, Professeur, INP de Grenoble
RIS Gabriel, Professeur, ESIAL, Vandoeuvre-lès-Nancy

Examineurs : BARTH Marc, Maître des conférences, HDR, INSA de Strasbourg
CHOULIER Denis, Maître des conférences, UT de Belfort-Montbéliard
DENIAUD Samuel, Maître des conférences, UT de Belfort-Montbéliard
FERNEY Michel, Professeur, UT de Belfort-Montbéliard

*A ma mère Marie Pascale
MEGNE,*

*Toi qui as sacrifié ta jeunesse
et ta vie pour nous élever,*

*Toi qui as tout fait pour moi,
de mon premier souffle de vie
jusqu'à ta douloureuse
disparition,*

*Toi qui n'as pas pu goûter
aux fruits de tes efforts,*

Je te dédie ce travail.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe CID (Conception Innovante et Distribuée) du laboratoire M3M (Mécatronique, Méthodes, Modèles, Métiers) de L'UTBM (Université de Technologie de Belfort Montbéliard).

Que Monsieur Frédéric NOEL, Professeur à l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble et Monsieur Gabriel RIS, Professeur à l'ESIAL-Université Henri Poincaré de Nancy I, soient assurés de mes sincères remerciements pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail et pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Marc BARTH, Maître des conférences, HDR à l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon Directeur de thèse, Michel FERNEY, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire M3M, et pour avoir toujours mis à ma dispositions tout le nécessaire afin d'assurer le bon déroulement des travaux. Sa parfaite direction a été très déterminante dans l'aboutissement de ce travail.

Que Denis CHOULIER et Samuel DENIAUD, Maîtres des conférences à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, reçoivent ma profonde reconnaissance, pour la valeur de leur encadrement de ce travail. Sans leur rigueur scientifique, leurs idées, leurs exigences, leurs conseils, leurs critiques et tout le reste, ce travail ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui. Je leur suis entièrement reconnaissant.

Que soient également assurés de ma reconnaissance, Olivier GARRO, Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et Bienvenu KENMEUGNE, chargé de cours et Chef de département du Génie Mécanique de l'IUT de Ngoundéré-Cameroun, pour les encouragements et sans qui je n'aurais pas pu engager ce travail.

Je remercie aussi Monsieur FOGUE Médard, Professeur et Directeur de l'IUT de Bandjoun-Cameroun, et Monsieur FOMETHE Analet, Professeur et Recteur de l'Université de Dschang-Cameroun, pour leurs multiples conseils et pour m'avoir initié à la recherche.

Je suis également obligé vis à vis de tous mes collègues du laboratoire M3M, tous mes collègues de l'IUT de Bandjoun-Cameroun, ainsi que tous ceux qui de près au de loin ont contribué à la réalisation de cette thèse. Pour sa fidélité, je citerai particulièrement Godpromesse KENNE, avec qui j'ai effectué une bonne partie de mon parcours.

Je ne saurai finir sans remercier ma tendre épouse Alice, pour sa patience et pour tout le soutien qu'elle n'a cessé de m'apporter pendant toute la durée de ce travail.

Sommaire

Introduction générale	13
Chapitre 1 Représentations en conception : État de l'art	19
1.1 Introduction : définition des représentations en conception, discussion et position.....	21
1.1.1 Définition.....	21
1.1.2 Discussion.....	22
1.1.3 Position et énoncé du plan	23
1.2 Intentions de conception – système d'intentions de conception.....	24
1.2.1 Définitions	24
1.2.2 Système idéal d'intentions de conception.....	26
1.2.2.1 Module d'enregistrement de l'historique de conception	27
1.2.2.2 Module d'enregistrement du raisonnement de conception.....	27
1.2.2.3 Module des modèles	28
1.2.2.4 Module paramétrique et variationnel.....	29
1.2.2.5 Module du moteur d'inférence	29
1.2.2.6 Synthèse.....	30
1.2.3 Utilisateurs des systèmes d'intentions de conception.....	30
1.2.4 Objectif global visé.....	31
1.2.5 Quelques recherches centrées sur l'intention de conception	32
1.3 Représentation par les modèles	35
1.3.1 Définition.....	35
1.3.2 Modèle du produit.....	35
1.3.2.1 Modèle physique du produit	35
1.3.2.2 Modèle fonctionnel du produit	37
1.3.2.3 Relation entre le modèle physique et le modèle fonctionnel.....	39
1.3.3 Modèle du processus de conception	39
1.3.4 Synthèse.....	41
1.4 Modélisations géométriques	41
1.4.1 Introduction.....	41
1.4.2 Dessin à main levée	42
1.4.2.1 Définition, méthode et situation	42
1.4.2.2 Rôles en conception.....	43
1.4.3 Représentations CAO	46

1.4.3.1	Introduction et historique de la CAO.....	46
1.4.3.2	Représentations géométriques classiques dans les systèmes CAO	47
1.4.3.2.1	Modèle bidimensionnel	47
1.4.3.2.2	Modèle 3D filaire.....	47
1.4.3.2.3	Modèle 3D surfacique.....	48
1.4.3.2.4	Modèles 3D solides.....	48
1.4.3.3	Utilisations de la CAO en conception mécanique.....	49
1.4.3.4	Modèle CAO, système idéal d'intentions de conception ?.....	50
1.5	Conclusion	51
Chapitre 2 Méthode du <i>Protocol Analysis</i>		53
2.1	Introduction.....	55
2.1.1	Méthodologie de recherche en conception	55
2.1.1.1	Situation.....	55
2.1.1.2	Démarche de recherche CID.....	56
2.1.2	Définition et choix du <i>protocol analysis</i>	60
2.1.3	Historique de la méthode du <i>protocol analysis</i>	61
2.1.4	Plan d'exécution du <i>protocol analysis</i>	62
2.2	Méthodes expérimentales	64
2.2.1	Critères de choix du problème de conception.....	64
2.2.2	Verbalisation.....	65
2.2.2.1	Modèle de traitement cognitif de l'information pour la verbalisation [ERI 1993]	67
2.2.2.2	Verbalisation concourante de la pensée.....	68
2.2.2.3	Verbalisation rétrospective de la pensée.....	71
2.3	Méthode d'analyse.....	74
2.3.1	Méthodes de segmentation	74
2.3.2	Méthodes de codage	76
2.3.2.1	Actes de conception.....	76
2.3.2.2	Approche orientée processus	77
2.3.2.2.1	Domaine du problème	77
2.3.2.2.2	Stratégies de conception	78
2.3.2.3	Approche orientée contenu	80
2.3.2.3.1	Catégorie physique.....	81
2.3.2.3.2	Catégorie perceptuelle	81
2.3.2.3.3	Catégorie fonctionnelle.....	81
2.3.2.3.4	Catégorie conceptuelle.....	82
2.3.2.3.5	Finalisation du codage.....	82
2.3.2.4	Approche adoptée.....	83
2.3.3	Méthodes d'étude de la fiabilité des résultats.....	83

2.3.3.1	Méthode Delphi.....	84
2.3.3.1.1	Étape 1 : formulation du problème	85
2.3.3.1.2	Étape 2 : sélection des experts.....	86
2.3.3.1.3	Étape 3 : rédaction du problème (premier et deuxième questionnaires, pré-test)	86
2.3.3.1.4	Étape 4 : tours de consultations, recueil et traitement des résultats.....	86
2.3.3.2	Méthode de Delft	87
2.4	Conclusion	89
Chapitre 3 Expériences de conception.....		91
3.1	Introduction.....	93
3.2	Validation de la méthode par une expérience préliminaire	94
3.2.1	Expérience de conception d'un bras oscillant de moto	94
3.2.2	Qualité de la verbalisation dans ce protocole et validité.....	97
3.3	Présentation de nos expériences	100
3.4	Problème de conception.....	102
3.4.1	Énoncé.....	102
3.4.2	Quelques éléments d'analyse du problème de conception	105
3.5	Organisation de l'expérience	107
3.5.1	Phases expérimentales	107
3.5.2	Déroulement des différentes étapes de l'expérience	108
3.5.2.1	Accueil et prise de connaissance de la partie principale des instructions du CTA	108
3.5.2.2	Exercice d'entraînement.....	109
3.5.2.3	Protocole du CTA.....	109
3.5.2.3.1	Application des instructions pour la méthode du CTA.....	110
3.5.2.3.2	Déroulement du CTA et présentation des solutions pour chaque concepteur.....	111
3.5.2.4	Débriefing.....	113
3.5.2.5	Protocole du RTA.....	115
3.6	Qualité de la verbalisation dans les protocoles.....	116
3.7	Présentation et organisation des données obtenues	117
3.8	Conclusion	118
Chapitre 4 Analyse du CTA : modèle d'activité de conception à l'aide d'un outil CAO		121
4.1	Introduction.....	123
4.2	Structuration et traitement des données obtenues du protocole.....	123
4.2.1	Segmentation des données obtenues.....	123
4.2.2	Codages des données obtenues.....	125
4.2.2.1	Catégories de codage des données verbales	126

4.2.2.2	Catégories de codage des données visuelles.....	127
4.2.3	Fiabilité de la segmentation et du codage.....	129
4.2.3.1	Étude de la fiabilité de la segmentation.....	130
4.2.3.2	Étude de la fiabilité du codage.....	132
4.3	Analyses spécifiques du CTA : activités de conception à l'aide d'outil CAO.....	134
4.3.1	Activités détectées à partir de la verbalisation	135
4.3.2	Activités détectées à partir de la vidéo	137
4.3.3	Activités de la verbalisation et activités de la vidéo mises ensemble.....	139
4.4	Résultat : modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO.....	144
4.4.1	Base du modèle : activités du modèle et regroupement par partie	144
4.4.2	Liens entre les différentes activités du modèle.....	146
4.4.2.1	Définition et notations	146
4.4.2.2	Quantification des liens dans les protocoles.....	147
4.4.2.3	Importance relative des liens entre les activités	148
4.4.2.3.1	Définition.....	148
4.4.2.3.2	Présentation de l'importance relative des liens dans les protocoles	149
4.4.3	Finalisation du modèle de conception à l'aide d'outils CAO.....	154
4.4.3.1	Modèle d'activités de conception issu des quatre protocoles.....	154
4.4.3.2	Modèle d'activité de conception synthèse.....	158
4.4.3.3	Interprétation spécifique de quelques liens.....	159
4.5	Conclusion	160
Chapitre 5 Comparaison entre CTA et RTA et définition d'un cadre pour attacher l'intention de conception au modèle CAO du produit		163
5.1	Introduction.....	165
5.2	Comparaison entre le CTA et le RTA	166
5.2.1	Procédure de déroulement	166
5.2.2	Filtrage des données	167
5.2.2.1	Premier niveau de filtrage.....	168
5.2.2.2	Second niveau de filtrage.....	168
5.2.3	Comparaison par rapport au nombre total de segments issus de la verbalisation	169
5.2.4	Comparaison par rapport aux domaines de travail	171
5.2.5	Comparaison par rapport aux types d'éléments de la partie conception	173
5.2.6	Comparaison par rapport aux types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail.....	175
5.2.7	Insuffisance des outils CAO actuels dans la représentation des intentions de conception.....	177
5.3	Cadre pour attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit.....	178
5.3.1	Introduction des intentions de conception dans le modèle CAO du produit.....	178
5.3.2	Structuration des données introduites	181

5.3.3 Restitution de l'intention de conception par le modèle CAO.....	185
5.4 Conclusion	186
Conclusion générale	189
Références bibliographiques.....	195
Annexes.....	206
Annexe 1 : Document pour les expérimentateurs	207
Annexe 2 : Documents pour les concepteurs.....	210
Annexe 3 : Correspondance des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation et vice versa.....	212
Annexe 4 : Découpage des modèles CAO en pièces.....	215
Annexe 5 : Nombre de segments d'éléments de la partie conception par domaine de travail	216
Annexe 6 : Type d'éléments de la partie conception dans les protocoles.....	217
Annexe 7 : segments intentionnels par types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail.....	219

Introduction générale

De nos jours, pour survivre à la compétitivité mondiale et au climat d'incertitude qui sévit dans l'environnement économique, l'entreprise doit être capable d'innover constamment et de répondre vite et sans erreurs aux besoins de ses clients. Soumis à des effets de renouvellement et à l'évolution technologique, les produits ont une durée de vie en constante diminution. La notion de temps devient alors un facteur majeur et primordial pour la survie de l'activité industrielle. Les clients, de leur côté, sont de plus en plus exigeants et désirent des solutions individualisées. De plus, devant l'abondance de l'offre, leurs comportements de consommation sont de plus en plus difficiles à prévoir. Le souci de l'entreprise d'être réactive à cette perpétuelle dynamique correspond à un des objectifs principaux de l'activité de conception des produits.

L'activité de conception correspond à la phase de définition et de développement d'un produit. Le produit doit répondre à un ensemble de spécifications fonctionnelles et techniques exprimées sous la forme d'un cahier de charges [PAH 1996]. La complexité du cahier de charges est due à la diversité des choix exprimés par les utilisateurs. L'importance de la phase de conception d'un produit est due aussi à l'influence des choix qu'elle impose aux phases en aval, telles que la fabrication, la maintenance, le stockage, la distribution etc. Ceci nous montre pourquoi il est de plus en plus important de s'intéresser à la manière dont les concepteurs de produits font leurs choix et comment ils les valident en fonction d'autres choix [HAD 2002].

Alors que les efforts dirigés vers le progrès industriel se sont longtemps adressés aux activités de production, l'importance de l'étape de conception sur la compétitivité des produits industriels en a fait un sujet d'étude privilégié, considéré comme le moteur de la réussite sur les trois plans {Qualité, Coût et Délai de mise sur le marché}. Outre cette triple réussite, la conjoncture économique impose aux entreprises de toujours progresser, de s'améliorer, pour au minimum suivre et au mieux devancer ses concurrents [LON 2004].

Les organisations industrielles ont changé afin de répondre le plus possible à ces impératifs. Des nouvelles techniques de travail ont ainsi vu le jour. Nous pouvons citer entre autres, les plateaux projets, la conception parallèle, l'ingénierie concourante ou simultanée et le travail collaboratif. Ces nouvelles techniques se destinent à mettre en œuvre des processus de conception plus courts et plus efficaces par la parallélisation ou la simultanéité des tâches, aboutissant à des produits de meilleure qualité et moins chers en intégrant tous les acteurs-métiers au plus tôt dans le processus de conception. La conception d'un produit fait ainsi appel à un grand nombre de compétences, d'autant plus grand que les technologies employées sont diverses. Il devient évident que cette diversité est à l'origine des contractions en termes d'objectifs qui sont spécifiques aux compétences et surtout aux technologies, les acteurs ne pouvant pas continuer à multiplier leurs compétences sans que cela n'ait d'incidence sur leur propre expertise. Dès lors, il devient indispensable de définir une standardisation qui permettra à chaque acteur/concepteur de comprendre les intentions des autres sans pour autant

être expert des domaines de compétence de ces derniers. Nous pensons que cette standardisation peut être obtenue pas les représentations en conception.

Nous entendons par représentation en conception, toute forme synthétique de restitution de la pensée du concepteur sur un support physique. La modélisation géométrique se présente alors comme un bon compromis à cet effet, notamment en conception mécanique où les outils CAO peuvent servir de cadres informatisés de ces représentations.

Notre travail se situe autour de l'analyse d'un processus de conception à l'aide d'un outil CAO. Il est avant tout un développement méthodologique, qui s'inscrit dans la démarche de recherche de l'équipe « conception innovante et distribuée » du laboratoire M3M de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM - France). L'un des objectifs de recherche poursuivis par cette équipe vise à améliorer la conception des produits et des systèmes mécaniques en proposant des méthodes, des modèles et des outils pour la conception. Nous estimons que ceci ne peut être possible que par une bonne compréhension des activités de conception qui peut être acquis par l'analyse de ces dernières.

Dans cette logique, nous avons entre autres objectifs, d'outiller et d'utiliser une méthode expérimentale à cette fin. Notre choix s'est porté sur la méthode de *protocol analysis* où le concepteur travaille et verbalise ses pensées. Dans cette direction, nous avons à monter deux types d'expériences. Un premier où le concepteur conçoit en verbalisant ses pensées (*Concurrent Think Aloud – CTA*) et un second où le concepteur conçoit d'abord, puis verbalise ensuite ses pensées en se servant du modèle CAO du produit (*Retrospective Think Aloud – RTA*). Nous avons pour but de définir un modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO et la définition d'un cadre qui permettra de spécifier un outil pour améliorer la conception, par une meilleure compréhension des intentions de conception pris en compte lors de la création des modèles CAO.

Nous présenterons dans cette thèse le parcours que nous avons effectué en cinq chapitres :

1. Représentations en conception : état de l'art
2. Méthode du *protocol analysis*
3. Expériences de conception
4. Analyse du CTA : modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO
5. Comparaison entre le CTA et le RTA et définition d'un cadre pour attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit

Dans le premier chapitre, nous ferons un tour d'horizon sur les représentations en conception. Une définition du terme intention de conception et une présentation d'un système idéal d'intentions de conception seront données. Ce système est constitué de modules : modules d'historique et de raisonnement de conception, module paramétrique et variationnel,

module des modèles et module des moteurs d'inférences. Une description de chaque module sera faite. Nous nous intéresserons spécifiquement au module des modèles, plus particulièrement à sa partie qui intègre la modélisation géométrique. Ce chapitre intégrera aussi un état de l'art sur les représentations en conception.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons la méthode que nous avons choisie. Elle s'appelle *protocol analysis* dans la terminologie anglo-saxonne. Nous commencerons par la situer dans la démarche de recherche de l'équipe CID qui sera elle-même située dans un schéma traditionnel de recherche et développement. Nous la définirons et nous la présenterons en trois parties : méthode expérimentale, méthode d'analyse, méthodes de fiabilité. La première méthode sera présentée en faisant ressortir les critères de définition d'un problème de conception et les méthodes de verbalisation qui définiront les types d'expériences que nous aurons à monter : la verbalisation concourante de la pensée (CTA) et la verbalisation rétrospective de la pensée (RTA). Quant à la méthode d'analyse, sa présentation concernera surtout la structuration des données obtenues et leur interprétation. Nous présenterons enfin les méthodes d'études de fiabilité des résultats obtenus.

Dans le troisième chapitre, nous exposerons dans un premier temps un plan inspiré de la littérature qui nous a servi de cadre pour le montage de nos expériences. Nous présenterons une expérience préliminaire, proche de nos besoins, qui a été montée dans notre équipe de recherche, qui nous servira de validation de la méthode et nous guidera dans le montage de nos propres expériences. Le montage et l'organisation de nos expériences seront ensuite présentés. Enfin, la structure des données brutes, obtenues à chaque étape de l'expérience, sera donnée.

Dans le quatrième chapitre, nous ferons une analyse du CTA. Les données seront d'abord structurées et une analyse de fiabilité sera faite. Nous présenterons les analyses que nous avons faites et le modèle d'activité de conception qui s'en est déduit.

Le cinquième chapitre comporte deux parties. Dans sa première partie, nous ferons une comparaison entre le CTA et le RTA. Elle se fera tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Il en sortira que le modèle CAO obtenu n'est pas encore une structure idéale pour la représentation des intentions de conception. Pour contribuer à l'enrichir, nous présenterons dans la seconde partie un cadre qui pourra permettre d'attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. Ce cadre permettra de créer ou d'enrichir les modules d'historique, de raisonnement et des moteurs d'inférence pour suppléer les modèles CAO actuels.

Chapitre 1

Représentations en conception : État de l'art

1.1 Introduction : définition des représentations en conception, discussion et position

Ce premier chapitre a pour ambition de définir et de faire un tour d'horizon des représentations en conception en fixant une orientation vers les objectifs à atteindre dans cette thèse.

1.1.1 Définition

De différentes façons, le concepteur a besoin d'externaliser ses idées pour les présenter à d'autres concepteurs, aux utilisateurs, aux gestionnaires et même pour lui-même. Nous appelons représentation de la conception les différentes formes d'externalisation de la pensée sur un support physique pendant le processus de conception. L'activité de conception est toujours accompagnée de représentations. Celles-ci se présentent comme des supports de stockage progressif de l'évolution de l'activité de conception. Elles doivent être élaborées de façon à décrire avec fidélité les pensées du concepteur. Ces descriptions de la pensée doivent être comprises par le concepteur lui-même et par toutes les personnes intéressées. De plus, l'action de représenter ne doit pas être contraignante pour le concepteur.

Plusieurs auteurs [ULL 1992 ; ULL 1995 ; DYM 1995 ; ERI 1999 ; REG 2000] ont investigué et mené des discussions sur les représentations en conception. Ils les ont qualifiées d'activités centrales en ingénierie de la conception. Les représentations en question ne concernaient que les dessins à main levée.

Joshua et Jami [JOS 2004] définissent la représentation comme la substitution d'une réalité par un symbolisme. Ils font une distinction entre la représentation et la modélisation. Ils présentent la modélisation comme le produit d'une représentation ou d'une simulation. En d'autres termes, un modèle est une incorporation d'une représentation spécifique pour un exemple spécifique.

La plupart des représentations de conception sont prévues pour présenter ou créer quelque chose de nouveau qui n'existe pas encore ou qui est encore en construction. Cela peut être une solution complète, des parties spécifiques d'une solution technique ou des procédures de description des travaux futurs à réaliser [KYN 1995].

1.1.2 Discussion

Dans plusieurs approches conventionnelles, les représentations du présent et du futur sont fondamentalement faites de la même manière, en utilisant les mêmes moyens. Ainsi, nous remarquons que les représentations en conception peuvent prendre différentes formes allant des formules mathématiques aux représentations graphiques en passant par des notations purement textuelles. Pour marquer cette diversité, Bodker [BOD 1998] présente des alternatives aux idées selon lesquelles les représentations de la conception sont simplement des projections graphiques des situations présentes qui seront exploitées dans le futur. Elle déclare que les représentations sont des stockages d'idées qui devraient être situées à la frontière des diverses activités de conception et d'utilisation. Pour elle, la représentation n'est pas seulement une question de notations ou de modèles formels. Elle inclut les prototypes, les maquettes et les simulations qui sont d'autres types de représentations avec des buts quelque peu différents dans la conception. Elle s'inspire des études faites sur le rôle des formalismes et des représentations dans d'autres domaines, plus particulièrement dans le domaine scientifique [LAT 1990 ; STA 1991 ; GOO 1994] pour fournir une meilleure compréhension de la place de ces types de représentation variés en conception. Elle observe que les représentations jouent un rôle dans la continuité du processus de conception et ont aussi un rôle de médiation. Les représentations permettront ainsi des médiations entre les concepteurs et leurs produits, entre un concepteur individuel et une équipe de conception, entre une équipe de conception et d'autres équipes de conception, et même entre un concepteur ou une équipe de conception et les futurs utilisateurs du produit.

Felicia *et al.* [FEL 2001] ont investigué le rôle des types de représentation utilisés pour enregistrer les idées de conception en phase conceptuelle. Pour des représentations différentes, ils ont utilisé un ensemble standard de mesures de résultats (maîtrise, qualité, nouveauté, et variété d'idées produites) pour tester et confirmer que la représentation graphique (image) est meilleure que la représentation textuelle pour la représentation des idées de conception et favorise mieux la génération des idées en ingénierie de la conception.

Zeng *et al.* [ZEN 2003] ont aussi travaillé sur l'établissement des fondations formelles pour la représentation et l'interprétation des idées de conception dans la phase conceptuelle de la conception mécanique. Ils utilisent des approches théoriques et expérimentales pour atteindre leurs objectifs.

Quand à Joshua et Jami [JOS 2004], ils effectuent une classification des différents types de représentations en conception en se basant sur le vocabulaire, la structure, l'expression, le but et l'abstraction de la représentation. Au vocabulaire de la représentation de la conception, trois attributs sont associés : le type d'éléments, la dimension et la flexibilité. La structure de la représentation est partiellement contrôlée par les configurations permises entre les entités et les relations. L'expression de la représentation est la façon dont elle est visualisée. Le type de

visualisation de la représentation est extrêmement important pour l'accèsion et le traitement de l'information qu'elle contient.

Les représentations sont donc développées par les concepteurs pour des buts spécifiques. Les utilisations générales que les concepteurs en font sont l'analyse, l'évaluation et la synthèse. Un autre but des différentes représentations en conception peut être la communication qui est destinée alors à véhiculer l'information.

1.1.3 Position et énoncé du plan

Pendant les dernières décennies, l'application informatique dans la conception mécanique a été développée intensivement pour les représentations. Elle a couvert l'analyse par éléments finis, l'optimisation des structures, le dessin assisté par ordinateur, etc. Les principales tâches de ces systèmes sont d'enregistrer méticuleusement chaque aspect de la conception, de l'analyser ou de l'optimiser efficacement. Ces applications sont principalement employées dans les phases intermédiaires (*embodiment*) ou de détail de la conception [ZEN 2003]. Malgré la grande disponibilité de tels outils sur le marché, le papier et le crayon sont restés les outils favoris pour les représentations en phase conceptuelle [SCH 1992]. Des études indiquent que la majorité des activités de conception dans cette phase se fait sous la forme de croquis à main levée [MCG 1998]. Cependant, dans les phases ultérieures de la conception, il reste indispensable de faire une représentation exacte (en forme et en dimension) du produit, qui permettra d'effectuer des tests numériques ou d'établir des gammes de fabrication.

Ainsi, toutes les intentions de conception doivent être prises en compte par les représentations. L'intention de conception apparaît donc comme un élément qui se trouve au cœur des représentations en conception. Dans ce chapitre, nous nous sommes d'abord intéressés aux questions suivantes : qu'est ce que l'intention de conception ? Pourquoi la placer au centre des représentations en conception ? Quels sont les types de systèmes existants qui permettent de prendre en compte, même partiellement, les intentions de conception dans les représentations ? Comment peut se présenter un système idéal d'intentions de conception ? Nous avons apporté une réponse à chacune de ces questions dans la deuxième partie de ce chapitre. Ainsi, nous avons explicité les parties du système idéal d'intentions de conception que nous proposons. Ces différentes parties ont été appelées module, du fait qu'elles peuvent permettre l'évaluation (ou la mesure) d'un système.

Comme base de développement d'un système idéal d'intentions de conception, nous avons choisi le module de représentation de la conception par les modèles que nous avons estimé le plus à même d'être utilisé pour le développement d'un tel système. La troisième partie de ce chapitre lui est consacrée. Nous y présenterons les modèles généraux de

représentation de la conception mécanique, à savoir, le modèle du produit et le modèle du processus de conception.

Par la suite, notre attention se portera sur les modèles géométriques, mode de représentation présent dans toutes les activités de conception mécanique. Nous estimons qu'il peut être enrichi pour soutenir toute l'activité de conception, de la génération des idées de la conception en phase conceptuelle jusqu'à l'aide à la fabrication numérique en passant par les tests et les simulations. La quatrième partie de ce chapitre est donc consacrée aux différents types de modèles géométriques, en décrivant leur technique de création, leur mode opérationnel et leur utilisation en conception.

1.2 Intentions de conception – système d'intentions de conception

La croissance et la complexité des projets de conception exigent la décomposition d'une tâche de conception, en tâches secondaires fortement couplées, qui demande le travail en collaboration de plusieurs concepteurs. Dans ce cadre, il est particulièrement important de pouvoir comprendre les intentions des concepteurs afin de gérer l'efficacité de la collaboration et de réaliser un travail de conception de bonne qualité. Par ailleurs, compte tenu des contraintes de disponibilité et d'optimisation de la productivité, il peut arriver que les tâches secondaires se fassent séparément et individuellement par des concepteurs différents, relevant de plusieurs domaines. Dans ce cas, il est également important pour chaque concepteur de pouvoir exprimer ses intentions de manière à être facilement compris par les autres et aux autres de pouvoir facilement interpréter les intentions du concepteur précédent pour de multiples raisons. De plus, l'expression de ses intentions peut se faire par le biais des représentations en conception. Idéalement, ces représentations ne devraient pas augmenter le fardeau du concepteur, pour ne pas limiter sa créativité. C'est en ce sens que des recherches ont été faites, visant à développer des systèmes d'intentions de conception qui permettent la représentation de la conception et l'interprétation des idées prises en compte dans cette représentation.

1.2.1 Définitions

Pour faciliter la compréhension et l'utilisation du terme «intention de conception», Stum *et al.* [STU 2002] soulignaient la nécessité de donner une définition universelle de ce terme pour éviter les confusions qui ont entouré son utilisation dans les communautés de la recherche en conception. Nous passerons en revue les différentes définitions rencontrées dans

la littérature et nous en ferons une synthèse afin de situer ce terme dans le contexte de notre recherche.

TLFi (Trésor de la Langue Française informatisé) [TLF] définit l'intention comme l'action de tendre vers une fin. Elle marque une direction de l'intelligence, et surtout de la volonté, vers une fin et l'effort que l'on fait pour l'atteindre. C'est aussi un dispositif de l'esprit, du mouvement intérieur par lequel une personne se propose plus ou moins consciemment et plus ou moins fortement d'atteindre ou d'essayer d'atteindre un but déterminé, indépendamment de sa réalisation, qui peut être incertaine ou à des conditions qui peuvent ne pas être précisées. Les mots arrière-pensée, calcul, désir, dessein, envie, idée, plan, prétention, projet, programme, propos, souhait lui sont apparentés. Conformément à cette définition, plusieurs auteurs ont proposé leur propre définition du terme intention de conception selon l'objectif de leur recherche et le contexte d'application du terme.

L'intention de conception est ainsi définie par Faucher *et al.* [FAU 2000] comme l'expression sous sa forme conceptuelle, d'une contrainte imposée ou non, influençant le projet. Ce sont les exigences fonctionnelles fournies par des clients, c'est-à-dire un jeu de règles fonctionnelles, voire géométriques, que le produit final doit satisfaire. Selon eux, la déclaration la plus concise de l'intention de conception est le dossier de conception. Le dossier contient les contraintes et les buts de conception.

Dans le même ordre d'idée, De La Garza *et al.* [GAR 1993] décrivent l'intention de conception comme une collection de données, de connaissances et de raisonnements qui fait avancer la création de la conception.

Pour Ullman [ULL 1994], l'intention de conception est le pourquoi et le comment de la conception d'un objet. Elle est liée au mécanisme de décision du concepteur et est reflétée dans le processus de conception. Son utilisation se réfère aux relations de cause à effet parmi les données du produit.

Ce terme signifie aussi le but ou le plan pour l'exécution des activités [ROS 1998]. Ce plan d'activités transforme un ensemble d'exigences initiales en spécifications finales pour le produit et pour la production. Il contient l'information sur le développement de la géométrie, sur l'évolution de la fonction et du comportement du produit et sur le raisonnement à la base des décisions de conception.

Henderson [HEN 1999] définit l'intention de conception comme le but ou le raisonnement sous-jacent derrière un objet.

Face à ces définitions variées de l'intention de conception, Stum *et al.* [STU 2002], essaient de faire une synthèse. Ils estiment que l'intention de conception est à la fois les exigences initiales de conception (exigences des clients) et le contenu même de sa conception. De ce fait, l'ensemble d'intentions de conception constitue les repères par lesquels le succès

de la conception devrait être jugé. Leur définition du contenu du terme « ensemble d'intentions de conception » est décrite sur l'arborescence de la figure 1.1.

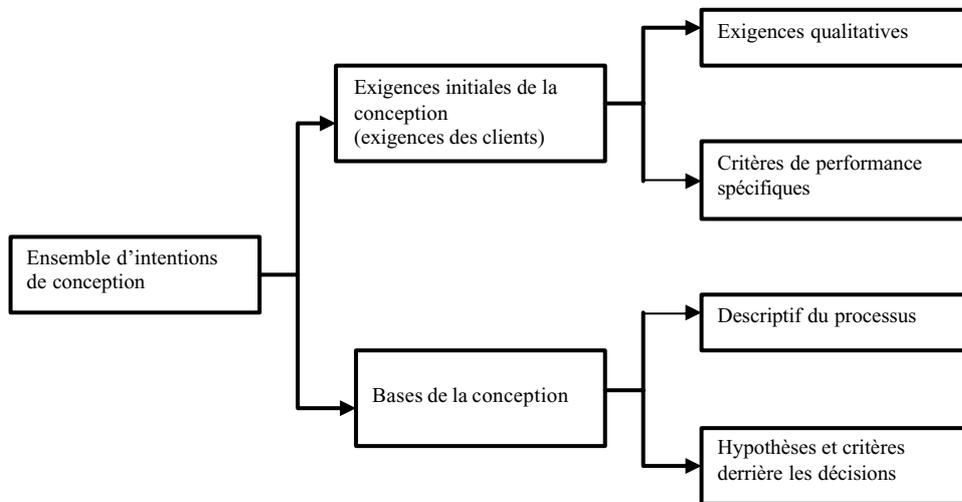


Figure 1.1 – *Ensemble d'intentions de conception [STU 2002]*

Les exigences initiales de la conception sont constituées des objectifs à atteindre, qui incluent les exigences qualitatives et les critères de performance spécifiques définis par le client. Ces critères doivent être mesurables en pratique.

La base de la conception est constituée des descriptions du processus, des critères et des hypothèses derrière les décisions qui sont regroupés dans le terme raisonnement de conception. Ainsi, cette base croît avec la progression du travail.

Cette synthèse indique que le terme intention de conception est utilisé pour décrire les spécifications initiales de la conception, c'est-à-dire le cahier des charges, et tout ce qui est apparu au cours du processus et qui a contribué à la progression de la conception. De ce fait, nous adoptons une définition globale qui consiste à considérer l'ensemble d'intentions de conception comme une collection de données, de connaissances et de raisonnements qui contribue à la conception. Des intentions sont posées explicitement au début de la conception, pendant que d'autres émergent au cours du processus de conception. Elles sont donc liées aux mécanismes de décision du concepteur et sont reflétées dans le processus de conception. Pour mieux les représenter, des systèmes, que nous appelons systèmes d'intentions de conception, sont nécessaires. Il nous apparaît important d'en décrire les caractéristiques qui permettront d'idéaliser de tels systèmes.

1.2.2 Système idéal d'intentions de conception

Déjà en 1985, Mostow [MOS 1985] parlait de système d'intentions de conception et lui attribuait les rôles suivants : documentation, compréhension, correction, vérification, analyse,

explication, modification et automatisation. Sur la base de cette caractérisation, nous proposons sur la figure 1.2 une schématisation d'un système idéal d'intentions de conception.

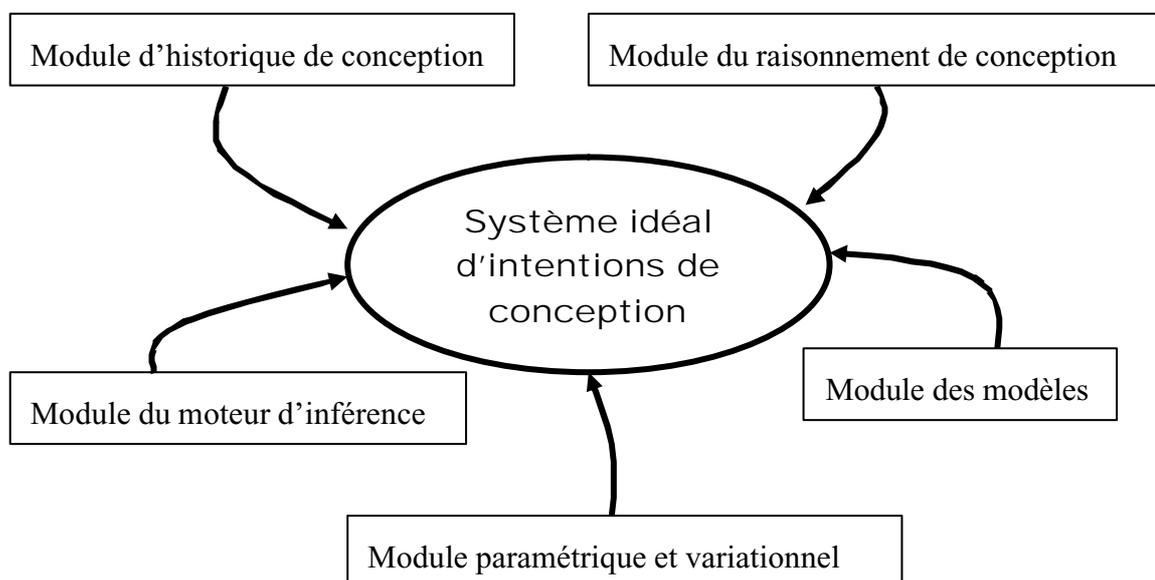


Figure 1.2 – Composantes d'un système idéal d'intentions de conception

Nous considérons donc qu'un système d'intentions de conception idéal doit avoir en son sein plusieurs modules ayant des rôles différents et complémentaires. Afin d'étayer notre approche, nous définirons et présenterons chacun de ces modules en rapport avec la littérature.

1.2.2.1 Module d'enregistrement de l'historique de conception

C'est un module simple qui enregistre la chronologie du processus de conception. Il peut prendre la forme d'un *notebook* où le concepteur écrit et dessine sur papier pour enregistrer les activités et les informations importantes concernant le projet de conception. L'un des inconvénients de ce module, quand il est utilisé seul comme système d'intentions de conception, est l'effort spécial fait par le concepteur, le lecteur ou l'utilisateur pour avoir accès à l'information dont il a besoin, car les informations enregistrées ne sont pas structurées et le raisonnement derrière les décisions prises ne sont pas explicites. L'avancée de la technologie a permis l'informatisation de ce module. Ainsi, des systèmes tels que *Microsoft Notebook*TM ont été créés. On trouve aussi des recherches faites sur ce module dans la bibliographie [BAS 1990 ; ULL 1991 et CHE 1991].

1.2.2.2 Module d'enregistrement du raisonnement de conception

Pour que le module d'enregistrement de l'historique de conception devienne plus utile dans un système d'intentions de conception, il est important de relever les raisonnements qui

sont derrière les décisions de conception. Cet enregistrement est fait par le biais du module de raisonnement de conception. Lakin *et al.* [LAK 1992] ont développé un système informatisé qui permet au concepteur de rentrer dans son travail et d'étiqueter rétrospectivement les décisions par les raisonnements de conception qui leur sont liés. Les problèmes, les alternatives, les évaluations et les raisons du choix d'une solution sont alors identifiés et notés dans les marges. Cette approche exige peu de travail additionnel pendant l'exécution de la tâche de conception. Cependant, elle manque de perfection et de cohérence, car des détails importants de raisonnement peuvent être oubliés pendant la rétrospection.

À l'opposé, il est développé dans [GAR 1993], une autre méthode en partant des hypothèses selon lesquelles, pour être capturé en entier, le raisonnement doit être relevé dans le contexte d'utilisation pendant le déroulement de la conception. Ces hypothèses impliquent que les concepteurs ont besoin de travailler sur des systèmes informatiques qui supportent toute l'activité de conception pour permettre au raisonnement d'être capturé pendant la conception. Cependant, il n'a pas été tenu compte dans [GAR 1993] de l'effort supplémentaire que le concepteur fournira pour exprimer son raisonnement et l'incidence que cela pourrait avoir sur sa créativité et sa productivité.

1.2.2.3 Module des modèles

Le module du système d'intentions de conception reposant sur les modèles exige que la structure de l'information au sujet de l'artefact conçu ou à concevoir soit connue d'avance. Ce type de système est limité aux situations courantes de conception qui ont une structure connue (conception routinière). Nous avons distingué à cet effet deux types de modèles : le modèle du produit et le modèle du processus de conception. Le modèle du produit se décompose à son tour en modèle fonctionnel et en modèle physique (figure 1.3).

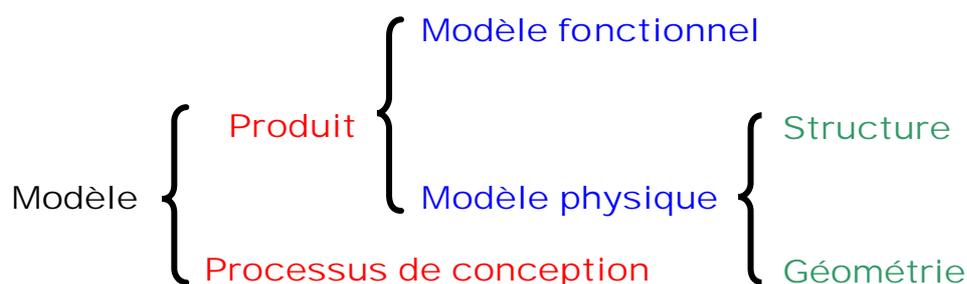


Figure 1.3 – *Module des modèles*

Compte tenu de la prépondérance et de la constance de l'utilisation de la géométrie en conception mécanique, couplées à la disponibilité des outils CAO qui définissent bien la géométrie d'un objet, nous avons adopté le module des modèles, plus particulièrement les modèles géométriques comme module de base pour le développement d'un système d'intentions de conception complet. Ce module ne devient vraiment opérationnel et utile que

si des paramètres leurs sont affectés et qu'un nouveau module permet leur gestion. C'est le module paramétrique et variationnel. Les deux modules sont tellement liés qu'on ne peut parler de l'un sans l'autre. Nous les avons dissociés par souci de bien expliquer le rôle de chacun.

1.2.2.4 Module paramétrique et variationnel

Ce module permet la construction des rapports ou des relations entre les contraintes pendant le développement de la conception. Les systèmes paramétriques et variationnels commercialisés de nos jours sont des systèmes graphiques et contiennent de façon incontournable un module des modèles (très souvent géométrique) avec des entités auxquelles des paramètres sont affectés. Leur aspect variationnel permet l'utilisation d'équations pour modéliser le comportement inclus dans un réseau de contraintes.

Les systèmes paramétriques et variationnels tiennent compte de la réutilisation de la conception à travers les paramètres. Il est alors facile de trouver des réponses aux questions concernant les effets de changement des paramètres et de leurs sensibilités. De cette manière, ils peuvent capturer des intentions derrière l'information modélisée.

Une limitation de ce module réside dans son incapacité à modéliser des structures de décision. Si par exemple la valeur d'un paramètre est calculée (ex. longueur d'une pièce), le système paramétrique donnera l'information sur la dépendance de cette longueur avec d'autres dimensions de la pièce, mais ne donnera pas le raisonnement derrière ces relations.

La plupart des systèmes existants et contenant ce module sont apparentés aux systèmes CAO, où les éléments conçus répondent uniquement à un besoin de création de la géométrie d'un produit en termes de fonctions à assurer et de solutions techniques. Or, les besoins sont beaucoup plus étendus. Les systèmes doivent être capables de supporter toute l'activité de conception et de permettre une représentation entière des intentions de conception. Aujourd'hui, les éditeurs de logiciel de CAO tentent, de plus en plus, une plus grande intégration des connaissances métiers. Mais, il n'est pas encore évident d'avoir les intentions de conception des modèles conçus.

Dans ces systèmes, toutes les informations ne peuvent pas être explicites. Certaines doivent être déduites de celles existantes. Nous avons appelé module du moteur d'inférence celui qui autorise une telle opération.

1.2.2.5 Module du moteur d'inférence

Ce module peut permettre d'avoir automatiquement des réponses aux questions sur l'intention de conception derrière une information enregistrée. Gruber *et al.* [GRU 1993] déclaraient déjà qu'il n'était pas suffisant de capturer et de stocker des informations et que des raisonnements pouvaient être déduits et construits à partir de l'information stockée. En

d'autres termes, les systèmes d'intentions de conception peuvent avoir à répondre aux questions qui exigent des informations différentes de celles qui avaient été enregistrées. Pour ce faire, les données doivent être structurées pendant la capture ou le stockage pour que des réponses puissent être données aux questions posées.

Des exemples de systèmes d'inférence sont présentés dans [VAR 1995] sous le nom de Système Expert. Dans de tels systèmes, l'expertise est exprimée sous la forme d'un ensemble de règles de production. On distingue les systèmes à base de règles qui reposent sur le fonctionnement suivant : « Déclencher des règles dès que les conditions sont satisfaites, suivant une stratégie donnée ». On peut également citer ANAXAGORE [VAR 1995], exemple de système qui cherche à harmoniser les différents aspects de la conception. Ce système propose une architecture de communication entre un générateur de systèmes experts et des outils CAO.

1.2.2.6 Synthèse

Les différents systèmes d'intentions de conception répertoriés jusqu'ici ont un point commun : ils cherchent à conserver l'information produite pendant l'activité de conception et à la structurer en vue d'extraire facilement le raisonnement pour faciliter la compréhension des intentions prises en compte. Ces systèmes capturent, gèrent et permettent le stockage de l'information de telle manière qu'elle soit facilement accessible et utilisable. Cependant, ces systèmes ne sont pas toujours parfaits pour supporter d'une façon optimale toute l'activité de conception. Aucun de ces systèmes n'intègre parfaitement tous les modules d'un système idéal d'intentions de conception. Ainsi, soit les méthodes d'utilisation de ces systèmes ne correspondent pas aux habitudes des concepteurs, soit ils augmentent leur charge ou ne sont pas capables de traiter tous les aspects de la conception. Un système plus général a donc besoin d'être développé. Nous pensons que les systèmes CAO actuels, qui ont en leur sein des outils performants pour la construction de la géométrie, peuvent servir de base à cet effet. Il s'agira alors de les enrichir et de permettre l'extraction aisée du raisonnement et de l'intention de conception des modèles qu'ils produisent.

1.2.3 Utilisateurs des systèmes d'intentions de conception

Les projets de conception sont aujourd'hui de plus en plus complexes et exigent que des concepteurs multiples travaillent en collaboration [ISH 2002]. Ainsi, les informations à propos de l'intention de conception sont utiles pour plusieurs groupes d'utilisateurs :

- les concepteurs originaux qui reviennent sur leur propre travail. Ils peuvent ne pas se souvenir clairement des raisons pour lesquelles ils ont précédemment pris certaines décisions et peuvent oublier des idées remarquables derrière certaines particularités. Un système d'intentions de conception doit donc être utilisé pour documenter la

progression de la conception, de telle manière que les informations stockées soient facilement récupérables.

- un autre membre de l'équipe de conception. Ces informations lui permettront de comprendre les idées des autres concepteurs, de juger et d'être en accord avec l'évolution du produit et du processus de conception. L'historique des décisions doit être enregistré dans le système, de façon à être facilement revue et utilisée par les autres membres de l'équipe de conception.
- les managers qui désirent suivre la progression du travail.
- les re-concepteurs qui ont besoin de comprendre les idées contenues dans les informations enregistrées, afin de les utiliser pour la conception d'un objet similaire ou pour modifier la conception initiale.

1.2.4 Objectif global visé

La compréhension de l'intention de conception est importante pour la gestion de la qualité, la réalisation de l'intégration logique des solutions et le transfert des connaissances de conception. L'intention de conception apparaît donc comme le pourquoi et le comment de la conception d'un objet. Elle doit être facilement représentable, accessible et récupérable à partir des représentations. La figure 1.4 synthétise l'objectif visé dans nos travaux.

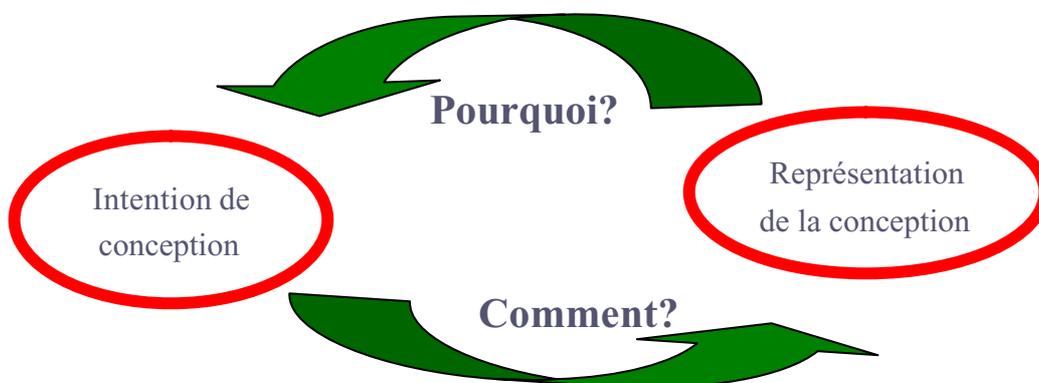


Figure 1.4 – Objectif global visé

La réponse à la question du comment est intéressante car elle permet de comprendre comment les spécifications initiales sont transformées en formes finales du produit. Elle permet aussi de comprendre le développement, le choix et la pertinence d'une solution. En bref, la question du comment permet de comprendre comment les intentions de conception sont prises en compte par la représentation du produit. Quant à la réponse du pourquoi, elle permet de connaître les raisons de l'existence de toutes particularités présentes sur la représentation de la conception. Nous estimons que les processus de réponse à ces deux

questions peuvent être aisés avec un système d'intentions de conception qui contient tous les modules décrits précédemment.

Des débuts de solutions ont été développés, afin de fournir un début de réponse à ces questions posées. Ils sont présentés dans la section suivante par une synthèse des travaux effectués et des systèmes développés, rencontrés dans la littérature.

1.2.5 Quelques recherches centrées sur l'intention de conception

En 1993, Henderson [HEN 1993] constatait déjà que les modes de représentation existants jusque-là n'apportaient pas facilement de réponses aux questions suivantes : quelle a été l'idée derrière la conception ? Pourquoi a-t-on utilisé ce cheminement ? Quelles sont les alternatives considérées ? Qu'est ce qui peut être changé ? Quels sont les effets de ce changement ?

Dans la même logique, Ullman [ULL 1994] déclarait ensuite que l'effort fourni pour capturer les intentions des concepteurs ouvrait la voie à des questions au sujet de la modélisation et du contrôle des informations développées au cours du processus de conception. Il avait constaté que ces questions n'avaient pas encore trouvé de réponses satisfaisantes dans leur globalité et arrivait à la conclusion qu'un système d'intentions de conception complet avait encore besoin d'être développé à cet effet. Ce constat reste valable aujourd'hui malgré les nombreuses tentatives effectuées. Les faiblesses résidantes dans ces tentatives viennent du fait que les systèmes développés étaient destinés le plus souvent à la résolution de problèmes particuliers et n'étaient pas des systèmes globaux. Citons en quelques uns.

Wiesel et Becker [WIE 1996] ont défini un assistant de CAO appelé PREVENT (*PeRformance EValuation ENlightenment Tool*), pour aider et évaluer la performance des diverses étapes de conception. Le système enregistre tout le processus de conception et produit à la fois l'évaluation et le diagnostic sur demande. Le modèle développé vise à soutenir et à enrichir le contenu des modèles CAO. Ils partent du fait qu'une compréhension de la conception par les représentations repose sur deux types d'information : l'information explicite et l'information implicite. L'information explicite est définie comme celle qui apparaît directement sur les représentations de la conception. Leur signification est donc claire et indépendante du contexte. Cependant l'intention qui lui est attachée peut ne pas être claire, car il existe d'autres informations qui ne sont pas directement entrées par le concepteur. Ce sont les informations implicites. Elles sont perçues comme les informations qui détaillent les intentions des concepteurs et ne peuvent être extraites que par des professionnels. L'information explicite et l'information implicite apparaissent essentielles pour la compréhension de l'intention de conception. Le système ainsi développé permet

l'enregistrement des informations explicites, mais ne montre pas comment les informations implicites pourront être déduites.

Myers *et al.* [MYE 1999] ont par la suite proposé une structure pour capturer le raisonnement de conception d'une donnée CAO générale. Le raisonnement de conception est déduit sur une base qualitative. Ils espèrent ainsi développer une structure applicable à un problème général de conception. Cependant, comme les autres modèles définis jusqu'ici, l'exigence excessive d'interaction avec les concepteurs limite leur efficacité. Sans le concepteur auteur du travail, il est difficile de savoir à partir des modèles toutes les idées prises en compte.

Faucher *et al.* [FAU 2000] proposent une méthode de prise en compte, dans un système de CAO, des intentions de conception relatives à l'ensoleillement, la visibilité et la réglementation urbaine. Ils montrent que, pour chacune des contraintes considérées, il est possible de représenter ses conditions de satisfaction sous la forme d'un volume à trois dimensions doté de certaines caractéristiques. L'approche de conception par les intentions est utilisée. Dans cette approche, un nouveau cycle commence par le début des nouvelles intentions ou par le raffinement des intentions précédentes. Une classe d'intentions peut être modélisée par des volumes géométriques de contraintes. Ces volumes géométriques représentent des sous-espaces dans lesquels les solutions, si elles existent, sont incluses. Une solution est une entité géométrique qui satisfait des contraintes.

Ching-Chih *et al.* [CHI 2000] utilisent les techniques de l'ingénierie inverse pour créer le modèle géométrique d'un objet existant conformément aux intentions de conception qui ont servi à sa création. Ils soulignent qu'il existe des situations de conception dans lesquelles un pré-modèle physique peut être produit avant la création du modèle CAO du produit final. C'est le cas du processus qui est utilisé pour concevoir un panneau de corps d'automobile. Un modèle en argile est d'abord réalisé à partir des croquis conceptuels donnant un aperçu du panneau. Après le perfectionnement de ce modèle d'argile, sa surface doit être modélisée dans un système CAO pour que d'autres composants liés puissent être conçus et ajoutés. Le corps du panneau peut alors être analysé et modifié et son processus de fabrication spécifié. Dans de telles situations, le modèle d'argile doit être utilisé par l'ingénierie inverse pour créer ou raffiner le modèle CAO correspondant à l'intention de conception.

Ishino *et al.* [ISH 2002] présentent une méthode d'évaluation de l'intention de conception. Cette méthode est présentée comme une addition de fonctions pondérées, basée sur l'information opérationnelle et spécifique du produit développé dans les processus de conception. Pour représenter et évaluer l'intention de conception, ils présentent un modèle d'évaluation de conception organisé comme un modèle général du processus de conception décisionnelle. Ils nomment leur méthode MEDI (*Methodology for Estimation of Design Intent*) qui est composée de deux algorithmes de base : le MPG (*Multiple Genetic Programming*) et une méthode d'analyse statistique multi-variantes incluant l'analyse du

principal composant et la régression multi-variantes. Le but de la méthode est d'extraire l'intention des concepteurs sur la base des données enregistrées du processus de conception, sans interrompre l'activité normale de conception. L'intention est alors traduite en modèle géométrique plus compréhensible. La méthode développée leur permet de réaliser ce but en extrayant les critères quantitatifs, subjectifs et pratiques employés par les concepteurs pour évaluer des alternatives de conception. Le principal problème auxquels ils sont confrontés vient de ce que le mécanisme de décision, dans les processus de conception, est souvent mal structuré et complexe. Le système de développement géométrique qu'ils proposent pour atteindre leur but est très simple. Par conséquent, il peut être très fastidieux pour la représentation des formes complexes.

Muna *et al.* [MUN 2003] présentent une autre approche d'échange d'intentions de conception appelée approche macro-paramétrique qui est une variante de l'approche procédurale. Dans cette approche, les modèles CAO peuvent être échangés sous forme de fichier incluant l'historique des commandes modélisées. L'intention de conception est représentée par des paramètres, des contraintes, des entités et de l'historique de construction de la géométrie. En traduisant l'ordre des commandes, l'intention de conception peut être déduite. La limite de cette approche vient du fait que les paramètres sont essentiellement géométriques et topologiques et que d'autres types d'informations ne peuvent pas être modélisés.

Malgré ces multiples travaux, le problème du développement d'un système idéal d'intentions de conception reste entier. La raison principale est qu'il est difficile de généraliser le concept d'intention de conception pour toutes les techniques. Ainsi, des études ont été faites pour résoudre des problèmes spécifiques dans un domaine précis. Par ailleurs, il est habituellement difficile pour le concepteur d'exprimer les critères de ses décisions. Cette expression prend toujours un temps et perturbe le travail, et même si le concepteur désire bien prendre ce temps, l'expression des critères quantitatifs, subjectifs et pratiques peut être difficile. Nos recherches sont des contributions pour faciliter la tâche du concepteur dans l'expression et la capture des intentions de conception sans altérer la qualité du travail. L'enrichissement des représentations par les modèles semble être pour nous une base pour atteindre nos objectifs. Ainsi, nous décrirons dans la section suivante, deux types de modèles complémentaires de représentation de la conception : le modèle du produit et le modèle du processus de conception.

1.3 Représentation par les modèles

1.3.1 Définition

Un modèle constitue une représentation abstraite de la réalité. Cette représentation peut être utilisée pour analyser, c'est-à-dire prédire des comportements de systèmes réels, ou pour concevoir, c'est-à-dire appréhender le comportement ou les fonctionnalités d'un objet ou d'un service en gestation [TOL 1998]. Un bon modèle doit représenter la pensée du modélisateur et permettre une communication sans ambiguïté avec ses utilisateurs. Ceci est aussi vrai pour le module du système d'intentions de conception reposant sur les modèles. Dans les paragraphes suivants, nous allons décrire quelques types de modèles que nous avons rencontrés dans la bibliographie.

1.3.2 Modèle du produit

On distingue ici le modèle fonctionnel et le modèle physique. Ces deux modèles constituent différents points de vue complémentaires du produit. En conception mécanique, ces deux modèles doivent être représentés pour rendre le modèle du produit complet. Cependant, on peut aussi représenter le produit selon d'autres points de vue (ergonomie, maintenance, financier etc.). Nous nous sommes uniquement intéressés dans cette section de la représentation selon les points de vue fonctionnel et physique.

1.3.2.1 Modèle physique du produit

Il est fréquent de faire référence à la représentation physique du produit qui est en fait sa décomposition physique en ensembles, sous-ensembles, pièces et entités. Un ensemble est composé de plusieurs sous-ensembles. Un sous-ensemble est composé de plusieurs pièces et une pièce est composée de plusieurs entités. Une entité est définie par un ensemble de paramètres qui vont par la suite permettre de décrire le modèle géométrique. Saucier [SAU 1997], dans sa thèse de doctorat, définit un formalisme qui permet une bonne lecture du modèle physique en proposant des possibilités pour plusieurs alternatives de conception dans le même modèle. Un exemple du modèle physique d'un stylo à bille est donné sur la figure 1.5.

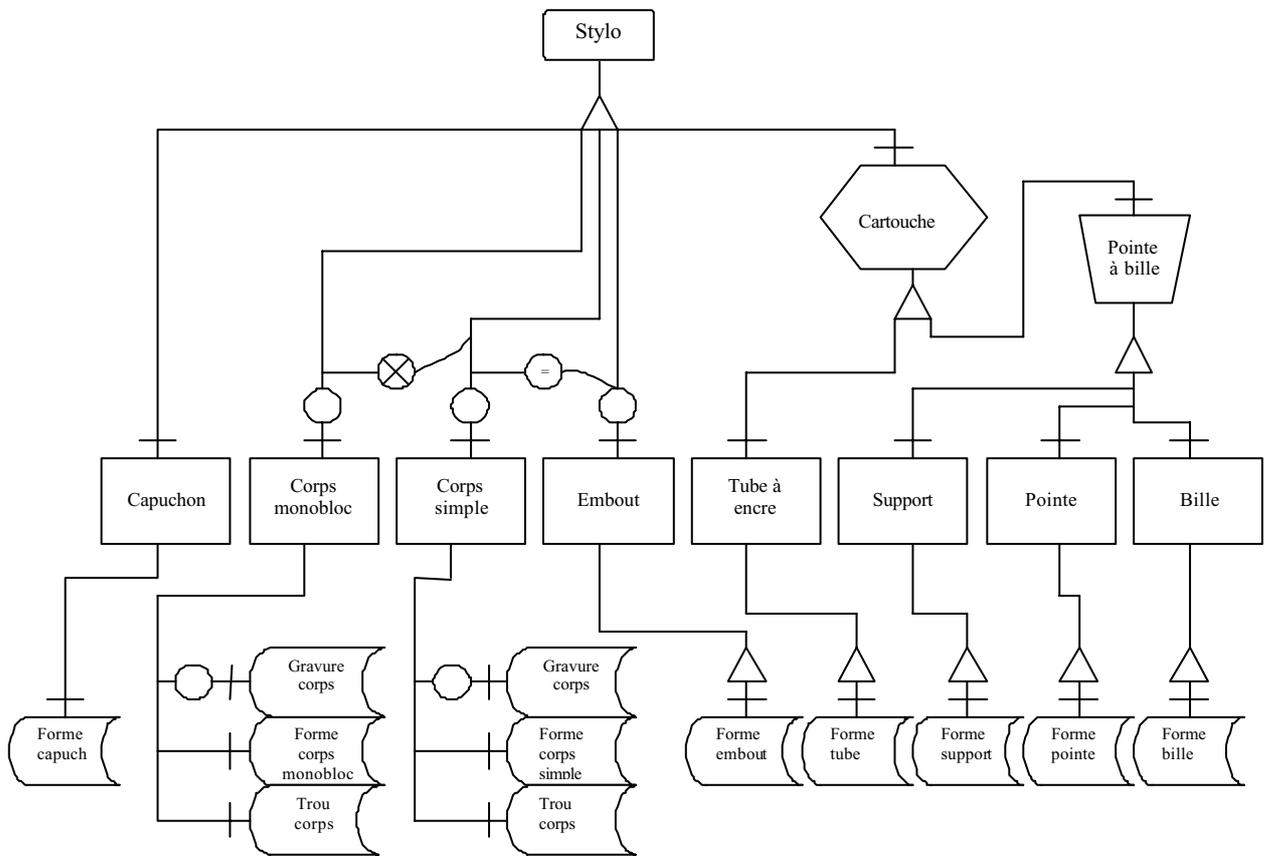


Figure 1.5 – *Modèle physique d'un stylo à bille [SAU 1997]*

Cet exemple définit ainsi cinq niveaux pour un modèle physique du produit :

- le niveau produit. Il sert de point de départ à la décomposition et représente l'objet de l'activité de conception. Le produit est en fait ce qui sera donné à l'utilisateur pour répondre à son besoin.
- les ensembles, qui sont des groupements de sous-ensembles assurant une ou plusieurs fonctions techniques qui les rendent aptes à remplir une fonction opérationnelle.
- les ensembles élémentaires, qui se décomposent uniquement en pièces.
- les pièces, éléments du produit, qui ne sont ni désassemblés, ni divisés lors d'une opération de maintenance.
- les entités, qui assurent le lien entre le modèle et la définition du produit sous forme de paramètres. Par définition, une entité est considérée ici comme un élément conceptuel rattaché à une pièce, contenant un ensemble de paramètres participant à la définition de la pièce, et dont l'existence est pertinente pour l'activité de conception.

Ces niveaux sont différemment représentés dans le modèle pour une meilleure lecture. Dans l'exemple du stylo à bille présenté sur la figure 1.5, les niveaux sont représentés comme indiqué sur la figure 1.6.

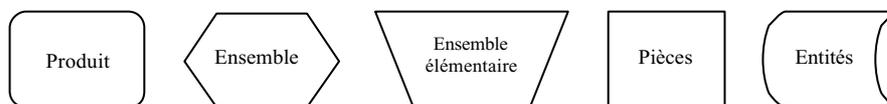


Figure 1.6 – *Formes associées aux niveaux dans le modèle physique du produit*

En plus de ces modes de représentation, des éléments de transition ont été aussi définis pour marquer le type de liens que les éléments ont entre eux. Ces éléments de transition sont explicités sur la figure 1.7.

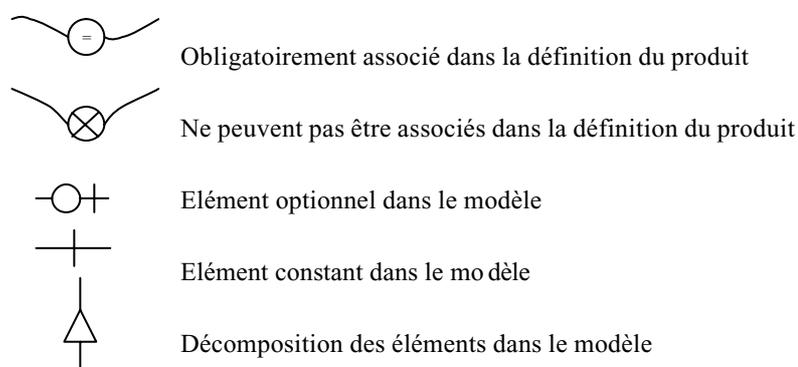


Figure 1.7 – *lien entre les éléments du modèle physique*

1.3.2.2 Modèle fonctionnel du produit

Le modèle fonctionnel décrit le produit du point de vue des fonctions à satisfaire. Ce modèle est étendu à la prise en compte des solutions satisfaisant les fonctions définies. Les fonctions sont alors décomposées jusqu'aux fonctions élémentaires correspondant à des solutions techniques. Les solutions techniques sont à leur tour affectées aux zones des éléments physiques qui les matérialisent. Ces éléments sont appelés entités. De la même façon que dans la section précédente, Saucier [SAU 1997] présente un modèle fonctionnel du stylo à bille (figure 1.8) pour étayer le formalisme qu'il a développé pour la représentation fonctionnelle du produit.

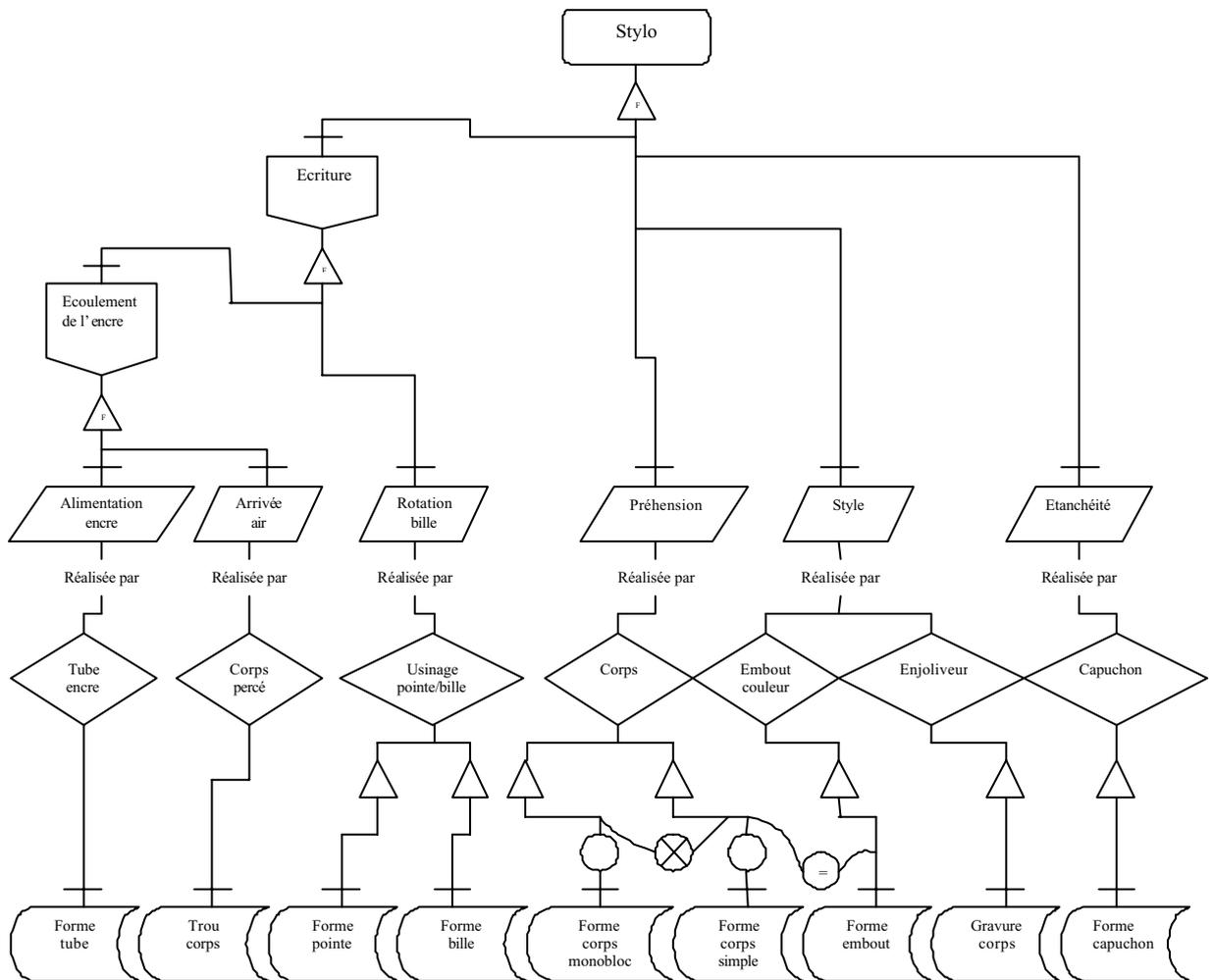


Figure 1.8 – *Modèle fonctionnel d'un stylo à bille [SAU 1997]*

Comme dans le cas du modèle physique de la figure 1.5, un modèle fonctionnel du produit est composé de cinq niveaux :

- le niveau produit, qui sert de point de départ à la décomposition et représente l'objet de l'activité de conception. Le produit est en fait ce qui sera donné à l'utilisateur pour répondre à son besoin.
- le niveau des fonctions. Une fonction est une action attendue d'un produit (ou réalisée par lui) pour répondre à un élément du besoin d'un utilisateur donné.
- le niveau des fonctions élémentaires. Une fonction élémentaire est une fonction qui n'est plus décomposée et à laquelle on associe une ou plusieurs solutions techniques.
- le niveau des solutions techniques. Une solution technique est un ensemble de paramètres (numériques, symboliques, techniques) définissant une solution possible pour la réalisation d'une fonction.

- le niveau des entités. Sa définition est la même que celle énoncée dans le modèle physique.

Les éléments du modèle fonctionnel sont représentés différemment pour une meilleure lecture. Les formes associées à chaque niveau du modèle sont données sur la figure 1.9.

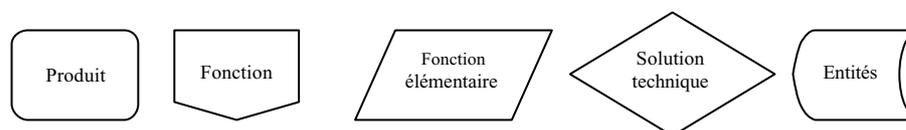


Figure 1.9 – *Formes associées aux niveaux dans le modèle fonctionnel du produit*

En plus de ces modes de représentation, des éléments de transition ont aussi été définis pour marquer le type de liens que les éléments ont entre eux. Ces éléments de transition sont les mêmes que ceux définis sur la figure 1.7 à deux différences près :

- Il est marqué un F dans la relation de décomposition quand il s’agit d’une décomposition fonctionnelle.
- Il y a une nouvelle transition dénommée « réalisée par ».

1.3.2.3 Relation entre le modèle physique et le modèle fonctionnel

Les modèles physiques et fonctionnels représentent deux points de vue sur un même produit et ne sont pas entièrement indépendants. Au contraire, ils sont conceptuellement liés et sont complémentaires. Une première observation montre que les deux modèles ont deux niveaux d’éléments en commun : le niveau produit et le niveau entité. Mais, bien que communes aux deux modèles, les entités d’une même pièce ne se trouveront pas à priori liées à une même fonction. Ainsi, le rattachement des solutions techniques aux entités dans le modèle fonctionnel se fait indépendamment des pièces auxquelles elles appartiennent dans le modèle physique. Pour le cas du stylo à bille par exemple, la solution technique associée à la fonction « rotation bille » comporte deux entités : l’entité « forme pointe » rattachée à la pièce pointe et l’entité « forme bille » rattachée à la pièce bille.

1.3.3 Modèle du processus de conception

Les modèles du produit ne permettent pas de connaître de quelle façon l’objet est conçu. Des informations relatives à « comment est-il conçu ? » ne font pas partie de ces modèles. Les réponses à cette question seront données par le modèle du processus de conception. Nous commenterons le cas du modèle du processus de conception par tâches.

Le modèle de processus de conception par tâches est une approche de modélisation utilisée pour des problèmes de conception routinière. Il s’agit de suivre le processus pas à pas. Cette approche que Ullman [ULL 1994] qualifie de « livre de cuisine » est matérialisée au

niveau du projet par les processus de développement détaillé du produit. Des méthodes de conception de ce type comme QFD (*Quality Function Deployment*) ou DFA (*Design For Assembly*) donnent la structure du raisonnement derrière certaines décisions prises. Malheureusement, elles ne les couvrent pas toutes pendant l'évolution du produit, surtout si elles ne sont plus cohérentes dans les informations traitées. Dans le but de surmonter ce handicap, Vargas [VAR 1995] présente dans sa thèse un modèle du processus de conception qui permet, d'une part, de représenter les différents problèmes à résoudre et, d'autre part, d'exprimer la dynamique associée à la résolution des problèmes. Pour modéliser le processus de conception, il propose les concepts suivants :

- Les tâches élémentaires, représentées sous forme d'arbre des tâches (figure 1.10) ;
- Les méthodes, représentées sous forme d'un graphe tâches/méthodes (figure 1.11).

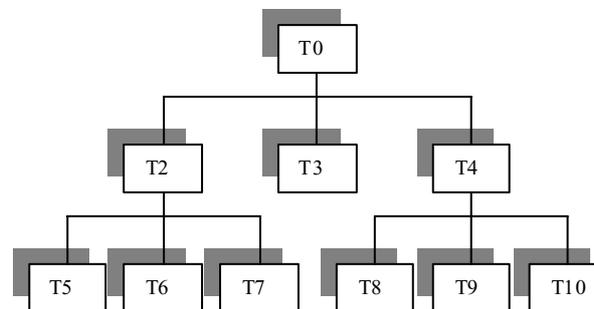


Figure 1.10 – Arbre des tâches [VAR 1995]

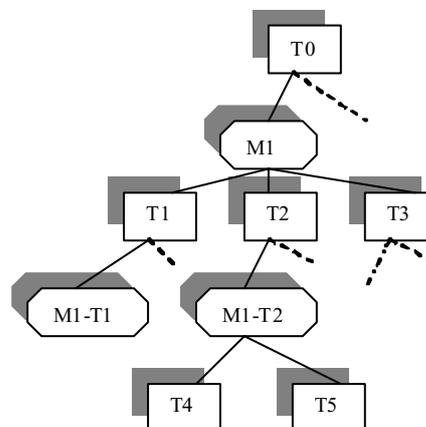


Figure 1.11 – Arbre des tâches/méthodes [VAR 1995]

Les tâches permettent de représenter l'ensemble des problèmes à résoudre. Une tâche correspond à un problème à résoudre ou encore à un but à atteindre.

Les méthodes permettent de définir les façons de résoudre les différents problèmes décrits par les tâches.

1.3.4 Synthèse

Nous remarquons que la définition géométrique des entités dans les modèles physiques et fonctionnels peut mener à la création du modèle géométrique du produit dans un modèleur CAO.

Comme nous l'avons déjà souligné, la conception par les modèles n'est efficace que dans le cas de la conception routinière. Elle permet, notamment, par la variation des paramètres affectés à ses éléments, de définir une famille de produits. Cependant, une situation de conception créative quelconque n'est pas toujours essentiellement routinière. Il est donc important de dépasser ce cadre routinier pour le remplacer par un cadre plus général. Comme la définition géométrique d'un produit est très importante en conception mécanique, nous pensons que ce cadre général peut être construit autour du modèle géométrique pouvant être généré efficacement dans les systèmes CAO actuels. Nos recherches sont donc des contributions à l'étude et l'optimisation des modèles géométriques, pour permettre aux systèmes CAO de gérer l'ensemble de la conception et devenir un système idéal d'intentions de conception. Pour mieux y arriver, il convient d'avoir une bonne connaissance des modélisations géométriques actuelles que nous présenterons dans la section suivante.

1.4 Modélisations géométriques

1.4.1 Introduction

La conception exige toujours une représentation bidimensionnelle ou tridimensionnelle indispensable pour l'exécution d'expérience, ou simplement pour l'assise d'un jugement [BEZ 1986]. Pour se représenter l'image de l'objet en cours de conception, le concepteur a besoin de le matérialiser sur un «support» physique. Ce support peut aller de la simple feuille de papier à l'ordinateur. Sur papier, l'objet est souvent représenté sous forme de croquis et est encore très peu précis. Ce croquis sert seulement de mémoire externe ou comme un fournisseur de réplique visuelle décrivant les informations non visuelles et les arrangements physiques dans lesquels les pensées du concepteur sont construites instantanément [SUW 1998].

Ces dernières années, on a noté un passage de plus en plus accéléré des outils classiques aux outils numériques dans le domaine de l'ingénierie de conception. Le développement des systèmes CAO a marqué une étape importante dans ce domaine. Les prototypes classiques sont en voie d'être largement remplacés par des maquettes numériques avec l'aide des technologies de la réalité virtuelle. Cependant, Schön *et al.* [SCH 1992] avaient souligné l'importance des croquis à main levée qui sont considérés comme propres à certains aspects de la conception malgré le développement des outils CAO. Ce constat reste d'actualité. Ainsi,

les croquis sont toujours intensément utilisés dans la première phase de conception. La CAO prend ensuite le relais pour une représentation plus précise en formes et en dimensions. De ces représentations CAO, on peut obtenir des maquettes numériques, des objets d'une usine numérique ou de la réalité virtuelle. Nous percevons toutes ces formes de représentation comme des modèles géométriques de l'objet conçu ou en cours de conception.

Nous considérons la modélisation géométrique comme la représentation d'objets du point de vue de leurs propriétés géométriques. Nous incluons dans notre définition les croquis qui constituent un passage important dans le processus de conception où l'objet est matérialisé approximativement en formes et en dimensions.

Dans cette section, nous discuterons des rôles et des modes de création des modèles géométriques en conception. Le dessin à main levée et le modèle CAO ont une place importante dans nos études. Nous allons plus particulièrement les explorer.

1.4.2 Dessin à main levée

1.4.2.1 Définition, méthode et situation

Les termes, dessin à main levée, croquis et esquisse sont apparentés. TLFi (Trésor de la Langue Française informatisé) [TLFi] donne une définition pour chacune. Ainsi, le dessin est défini comme l'art de représenter des objets, des idées ou des sensations par des moyens graphiques, alors que l'esquisse est définie comme les premiers traits d'un dessin indiquant les grandes lignes du projet et servant de base à son exécution définitive. Quant au croquis, il est défini comme la représentation figurative (d'un sujet) réduite à ses éléments essentiels. Ainsi, notre conception du terme « dessin à main levée » contient les substances de ces trois définitions. Nous les utiliserons pour qualifier tout ce que le concepteur représente à main levée. Nous décrivons ci-dessous la justification de cette utilisation inspirée de quelques auteurs.

Ainsi, un croquis s'effectue grâce aux mouvements de la main, par les crayons ou les stylos sur le papier ou autres supports. Il se trouve ainsi au cœur de la communication visuelle en conception et favorise des échanges de pensées. Il est une activité prédominante dans la conception. Ullman *et al.* [ULL 1990] réalisent des expériences et montrent que l'activité cognitive lors du dessin à main levée représente 67% du total nécessaire à la production des solutions pertinentes de conception.

Dessiner à main levée est presque entièrement un processus mental. Des pensées sont puisées de l'esprit à l'aide d'un crayon et la rétroaction permet au concepteur de raffiner et documenter la conception [MCK 1980]. Caractérisées par leur ambiguïté et leur densité informationnelle, les esquisses contribuent positivement à faire émerger les aspects créateurs et explorateurs de la résolution des problèmes [MCG 1998].

Par ailleurs, d'après Newell et Simon [NEW 1972], l'esquisse réduit la demande sur la mémoire à court terme en augmentant la stabilité de la mémoire et permet plus facilement l'analyse et le stockage des idées à travers les dessins. L'esquisse est un moyen d'amélioration, de l'évaluation et de l'ajustement des problèmes de conception en facilitant et en gardant un enregistrement du processus créateur [MCG 1998]. Les concepteurs font itérativement des cycles rétroactifs de l'enregistrement sur les croquis et passent en revue leurs idées. D'une façon plus large, plusieurs auteurs ont énoncé les rôles du dessin à main levée en conception. Nous les décrivons succinctement dans le paragraphe suivant.

1.4.2.2 Rôles en conception

Les croquis à main levée peuvent être utilisés comme une mémoire externe de stockage [NEW 1972 ; ULL 1990]). Ainsi, ils aident dans la capture des images passagères [MCK 1980]. Ils augmentent la compréhension personnelle et fournissent une rétroaction externe entre le concepteur et sa conception [MCK 1980 ; MCG 1998]. Ce sont des formes concises de la représentation des données [LAR 1987 ; BIR 1997]. Ils peuvent fournir des connexions additionnelles et augmenter la perspicacité visuelle [SUW 1997 ; PUR 1998 ; GOE 1995]. Goldschmidt [GOL 1994] déclare que les croquis fournissent une rétroaction (émetteur-récepteur) au concepteur. Ainsi, pendant un cycle de dessin à main levée, le concepteur est en pleine « conversation » [SUW 1997]. L'esquisse est donc essentielle quand on essaie de développer ou de partager des idées et des informations [HEN 1999].

Pour bien mettre en exergue le rôle des croquis à main levée en conception, Shah *et al.* [SHA 2001] ont proposé un modèle du processus de pensée de conception par les croquis décrit sur la figure 1.12.

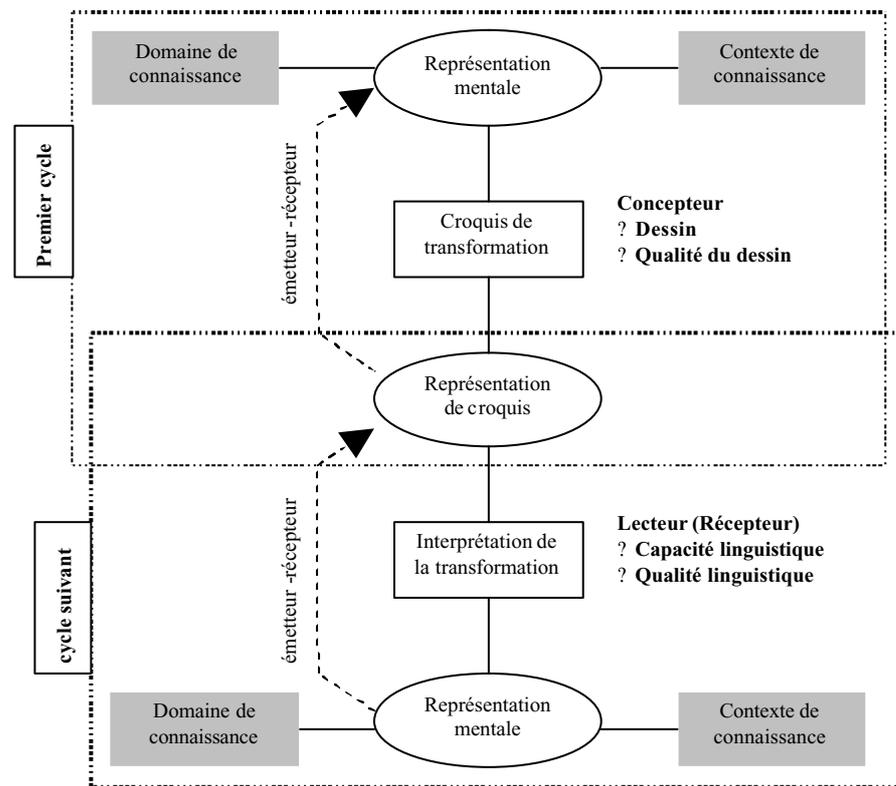


Figure 1.12 – Rôle du croquis dans la génération et l'interprétation des idées de conception [SHA 2001]

Dans ce modèle, un concepteur initial génère des idées. Son esprit effectue une recherche dans une large base de connaissances (domaine de connaissance) et, à travers une base spécifique liée au problème (contexte de connaissance), il se fait une représentation mentale de la conception. Cette représentation évolue graduellement et se transforme ensuite en représentation physique. L'idée du concepteur est alors transformée en solution graphique (croquis) ou textuelle (phrases).

Le processus d'émetteur-récepteur produit de nouvelles images mentales quand le concepteur voit son idée physiquement représentée. Il peut alors réaliser des changements à l'idée originale. Le processus d'émission – réception est répété jusqu'à la satisfaction de la solution de conception résultante. Le processus interne est similaire à la réflexion dans l'action (*Reflection-in-action*) décrit par McGown *et al.* [MCG 1998].

Après la représentation de la solution de conception dans le premier cycle, on passe au cycle suivant où cette solution doit être comprise par un autre concepteur (ou par le même concepteur) encore appelé lecteur ou récepteur. Il est alors question d'effectuer une transformation de la représentation physique faite dans le premier cycle en représentation mentale pour mieux comprendre la conception. Cette transformation se produit de manière

opposée à celui du premier cycle. Sa célérité et son efficacité dépendent de la capacité et de la qualité linguistique du domaine et du contexte de connaissance.

Ce schéma du rôle du croquis dans la phase conceptuelle de la conception est condensé par Tovey *et al.* [TOV 2003] et Zeng *et al.* [ZEN 2003] qui donnent au dessin à main levée trois fonctions principales : la représentation, l'interprétation et la pensée visuelles. La représentation visuelle est utilisée pour enregistrer et communiquer. Elle fournit au concepteur la possibilité d'exprimer et de communiquer ses idées créatives au sujet de la forme et des fonctionnalités d'un produit. L'interprétation visuelle est utilisée pour l'évaluation de la conception. Elle donne à des concepteurs un accès direct à l'évaluation intuitive du concept de conception par rapport aux spécifications de la conception. La pensée visuelle est la production des pensées créatives en utilisant l'imagerie visuelle. Ainsi, pendant le dessin à main levée, une partie de l'esquisse fournit des sélections visuelles et aide à maintenir une production continue d'idées originales. Quand l'idée de conception prend forme dans l'esprit du concepteur, l'esquisse est utilisée pour représenter ces images mentales. Le processus qui englobe ces trois fonctions (représentation, interprétation et pensée visuelles), mènent à la découverte créative [VER 1998]. La découverte créative est le résultat d'un ensemble d'opérations mentales sur une image visuelle.

Puisque la vitesse avec laquelle on dessine et l'exactitude du mouvement de la main est requise pour une bonne pensée visuelle, le papier et le crayon sont les outils idéaux pour les dessins à main levée [ZEN 2003]. Cependant, les croquis sur papier sont difficiles à modifier et à stocker. Ils exigent habituellement de refaire de façon répétitive des portions d'esquisses, ce qui peut prendre du temps. En outre, les croquis sur papier peuvent se perdre, car ils sont au mieux rangés dans un classeur de sorte que seulement le concepteur original se rende compte de son existence et des idées qu'ils représentent. La réutilisation de la conception existante devient alors difficile.

Bien que les croquis à main levée possèdent beaucoup d'avantages et sont encore très utilisés dans les premières phases de la conception et même dans la phase intermédiaire (*embodiment*), ils possèdent beaucoup d'inconvénients dus, d'une part à l'imprécision de la géométrie créée et d'autre part à la difficulté de leur réutilisation. De plus, des tests et des simulations ne peuvent pas se faire avec les croquis. Ceci a conduit à la mise au point d'outils plus évolués pour la conception. Cependant, ces outils demeurent très contraignants d'utilisation pendant la phase conceptuelle et limitent la créativité du concepteur. L'un des objectifs visés dans cette thèse est justement de pallier à ces manquements. Ainsi, la connaissance de ces outils et leurs rôles actuels dans la représentation de la conception est primordiale. Nous commençons par décrire dans la section suivante (1.4.3), les recherches développées sur les représentations CAO.

1.4.3 Représentations CAO

1.4.3.1 Introduction et historique de la CAO

Les premiers travaux consacrés à la réalisation des formes compliquées furent probablement accomplis, après 1942, en commun par IBM et Bendix-Aviation pour l'usinage de prototypes de came et d'ailettes de turbines à gaz. Ensuite, vers 1955, les programmes APT réalisaient le détournage bidimensionnel de profils constitués presque exclusivement de segments de droite et d'arcs de cercle [BEZ 1986].

À l'exception des recherches accomplies dans l'industrie aéronautique aux USA, la plupart des premiers travaux sur la CAO visaient à fournir aux concepteurs et aux ingénieurs le moyen de tracer des objets mécaniques conçus selon une méthode extrêmement traditionnelle, à l'aide de la règle et du compas [LAC 1987]. Les débuts véritables de la CAO se sont faits dans les années 60 et consistaient essentiellement à informatiser la planche à dessin traditionnelle. On ne parlait pas encore de CAO, mais de DAO. Dans les années 70 et 80, la DAO a ainsi permis aux entreprises d'entamer le processus d'informatisation de leurs méthodes de dessin 2D. Parmi les logiciels ayant servi à cet effet, on peut citer AutoCAD de la société Autodesk. Les années 90 ont vu l'essor des modélisations volumiques et solides (3D). On est passé ainsi de la DAO à la CAO. Parmi les logiciels commerciaux ayant servis à cet effet, on peut citer Euclid, Catia, Pro/Engineer, Solidworks, etc. Depuis les années 2000, plusieurs chercheurs [PIE 2005 ; XU 2005 ; MEN 2003 ; MUN 2003 ; SIU 2001] se sont penchés sur l'étude de l'utilisation de la CAO en conception.

La CAO garde une place centrale en conception mécanique. Loin de supporter seulement les représentations de la conception, elle sert à décrire, manipuler, analyser, simuler ou optimiser numériquement les multiples représentations de l'objet à concevoir ou en cours de conception. Les systèmes CAO regroupent ainsi en leur sein plusieurs modules du système idéal d'intentions de conception que nous avons définis précédemment, notamment les modules de modèle (modèle physique du produit), paramétrique et variationnel. Cependant, ils ne participent pas activement aux mécanismes des nombreuses prises de décisions que comporte la conception. Par exemple, l'essentiel de ces mécanismes n'est pas enregistré dans le système. Ainsi, il n'est pas toujours possible de comprendre les intentions de conception derrière chaque particularité géométrique d'un modèle CAO. Malgré ce manque, somme toute majeur, nous avons estimé que les systèmes CAO pouvaient être améliorées pour soutenir entièrement le processus de conception. Nous avons donc choisi les modèles CAO comme point de départ pour la représentation idéale de l'intention de conception. Ainsi, il nous paraît pertinent de décrire ces modèles tels qu'ils existent actuellement en insistant sur leurs modes de création et leurs rôles en conception en référence à la bibliographie.

1.4.3.2 Représentations géométriques classiques dans les systèmes CAO

Il existe plusieurs types de modèles de représentation géométrique d'un objet dans les systèmes CAO. Ils vont du modèle bidimensionnel (2D) à plusieurs variantes du modèle tridimensionnel (3D).

1.4.3.2.1 Modèle bidimensionnel

Les représentations bidimensionnelles (2D) sont dans leur majorité l'informatisation des tracés sur planche à dessin. Elles sont donc à cet effet appelées Dessin Assistée par Ordinateur (DAO).

Un modèle géométrique 2D a pour objectif la manipulation des informations de types géométrique, topologique, structuration, habillage, relation et visualisation.

Les éléments géométriques sont les points, les droites et les segments de droites, les cercles et les arcs de cercles, les coniques en général et les formes complexes du type polynôme, Bézier, B-spline, NURBS, etc. [MEK 1998]. Tous ces éléments filaires peuvent former un nouvel élément appelé section ou contour qui intègre la notion d'intérieur et d'extérieur et permet la mise en jeu des techniques de hachurage et de calcul des surfaces. De plus, il est possible de disposer des opérations d'union, d'intersection, de soustraction de contour pour former un nouveau contour.

Bien qu'un modèle 2D soit rapide à mettre en œuvre et à modifier, il est peu riche et très limité. C'est la raison pour laquelle on a très tôt pensé à plusieurs techniques plus ou moins complexes pour les représentations volumiques et solides (3D).

1.4.3.2.2 Modèle 3D filaire

Le modèle filaire donne une image de l'armature de l'objet géométrique. Il contient les éléments définis à la section précédente, plus des éléments surfaciques non bornés définis par leur seule expression analytique (plan, cylindre infini, cône infini, sphère). La notion d'intérieur et d'extérieur n'existe pas. Il n'y a pas de surface ni de volume associé à l'objet. Ce modèle ne connaît que les sommets et les arêtes. On peut simplement avoir un traitement d'arêtes cachées qui permet une perception 3D à l'écran pour une forme peu complexe. Les volumes, les centres de gravité, les matrices d'inertie ne peuvent pas être estimés.

Dans les modeleurs géométriques actuels, le modèle filaire est utilisé pour la représentation des axes, des contours servant à générer des surfaces ou des solides. En CAO mécanique notamment, il sert essentiellement à définir des points et lignes de construction, ainsi que des surfaces élémentaires, points et lignes servant à la définition des surfaces complexes et des volumes. Le modèle final du produit ne contient que peu d'éléments filaires dans sa représentation. Mais, l'obtention du modèle final peut impliquer la construction de beaucoup d'éléments filaires.

1.4.3.2.3 Modèle 3D surfacique

Le modèle surfacique représente l'objet par ses faces (on dit aussi sa peau). Les surfaces permettent de créer des géométries complexes. Les propriétés physiques de l'objet (masse, centre de gravité, volume, inertie) ne sont pas connues.

Le modèle surfacique est utilisé pour la modélisation des surfaces complexes. On peut construire une surface à partir des éléments filaires (point, droite...). Les surfaces peuvent ensuite être assemblées pour former des solides de formes complexes.

Actuellement, presque tous les modeleurs géométriques utilisent un noyau surfacique destiné principalement à la définition géométrique de formes libres et complexes. Ce type de modélisation répond à de nombreux problèmes de l'industrie (carrosserie, aube de turbine, etc.).

1.4.3.2.4 Modèles 3D solides

Le modèle solide permet de représenter les propriétés physiques des objets (masse, centre de gravité, volume, inertie). La création du modèle solide d'un objet est souvent plus rapide que celle du modèle surfacique.

Une analyse des différentes représentations internes pour les modèles géométriques solides permet de définir deux modes généraux et principaux: la représentation par les limites de l'objet (*Boundary Representation* ou B-Rep) et la représentation paramétrique solide (*Constructive Solid Geometry* ou CSG).

Pour la représentation par les limites, le modèle conserve les limites d'un solide, par exemple les faces, les arêtes, les sommets et les relations entre eux. Les surfaces définissant le solide doivent être fermées, orientables (intérieur, extérieur), bornées, être d'un seul morceau et ne doivent pas se couper.

La représentation paramétrique solide conduit à un type de modélisation que l'on peut associer à l'arbre de construction de l'approche dite CSG. Ce mode englobe aussi la représentation d'un solide par l'énumération des positions occupées dans l'espace et qu'on peut simplifier par un assemblage de boîtes élémentaires collées les unes aux autres. La pièce est définie par la juxtaposition des volumes simples préalablement construits. Les solides peuvent être combinés par des opérations booléennes (soustraction, addition, intersection, etc.).

D'autres modes de représentations solides existent dans les modeleurs géométriques. Ils sont mis en œuvre en générant un solide à l'aide des éléments filaires ou surfaciques. Ainsi, on peut par exemple générer un volume à partir d'une section plane en l'extrudant. L'extrusion consiste à créer des volumes en partant d'un dessin à deux dimensions auquel on va affecter une profondeur. Elle peut aussi être réalisée d'une forme vers une autre, selon un

chemin rectiligne, circulaire, hélicoïdal etc. Il existe aussi la possibilité de créer ou de modifier des volumes de façon libre sans passer par l'extrusion.

Ainsi, dans un modèleur géométrique tridimensionnel, les représentations surfaciques par les limites et paramétrique solide coexistent pour pouvoir élaborer des volumes complexes de la manière la plus pratique pour le concepteur.

1.4.3.3 Utilisations de la CAO en conception mécanique

Le modèle CAO permet la représentation concise de l'idée du concepteur et peut servir alors de mémoire de stockage externe. Ainsi, l'utilisation de la modélisation CAO permet de prendre en compte quelques idées développées pendant le processus de conception concernant plusieurs disciplines [MEK 1998]. Pour ne s'en tenir qu'aux principaux, nous citons :

1. Gestion de la géométrie. Par les techniques développées précédemment, les modèleurs géométriques peuvent :

- Concevoir les formes générales 2D et 3D.
- Concevoir des formes dans l'optique d'être fabriquées par un procédé particulier (tôlerie, moulage, estampage, etc.). Par exemple, en pliage, les formes doivent être développables ; en moulage et estampage, les pièces présentent des dépouilles de part et d'autre des plans de joints.
- Permettre l'assemblage des pièces pour générer des plans et des nomenclatures d'ensemble. Généralement, l'assemblage se fait en décrivant les liaisons mécaniques.
- Offrir des fonctionnalités d'analyse de la géométrie (masse, centre de gravité, matrice d'inertie, etc.)
- Permettre le tolérancement.

2. Mise en plan. Sortir des plans cotés contenant des informations technologiques selon la convention du dessin industriel.

3. Visualisation réaliste. Il s'agit d'avoir une vision réaliste, colorée, d'une pièce ou d'un assemblage, pour mieux distinguer et appréhender son aspect.

4. Fabrication. En plus de la conception des formes pour certains procédés de fabrication déjà énumérés, on peut noter, dans les modèleurs CAO, des modules concernant la simulation d'usinage par enlèvement de matière (tournage, fraisage, etc.). Ils permettent de déterminer la trajectoire d'usinage, de manière à générer les codes destinés à la machine-outil à Commande Numérique (CN) pour les différentes passes et à évaluer le temps de l'opération et l'usure de l'outil.

5. Robotique. La suite logicielle Delmia V5 de Dassault Systèmes possède un module robotique de programmation des tâches d'un robot et assure la coordination d'un ensemble de robots au sein d'une cellule robotisée. On peut citer aussi le logiciel Robcad de Tecnomatix

EMPower (appelé aussi UGS Tecnomatix EMPower depuis que UGS a acheté Tecnomatix) qui propose des modules de soudage par points, par arcs, peinture et métrologie.

6. Calculs mécaniques. Les logiciels de CAO actuels permettent aussi des calculs mécaniques variés. Entre autres, on a :

- Le pré-dimensionnement : ces environnements permettent de dimensionner rapidement une architecture de système mécanique en utilisant des outils de conception mécanique intégrés et des fonctionnalités d'optimisation.
- Calculs des structures : ces calculs se font par éléments finis sur les solides modélisés géométriquement. Il existe des modules de calcul de structure intégrés à certains gros logiciels de CAO actuels. Citons par exemple Catia, I-Deas ou le module Pro/Mechanica de Pro/Engineer.
- Cinématique et dynamique : à partir du module d'assemblage dans lequel ont été définies les liaisons mécaniques, la donnée des lois de mouvement pour les degrés de liberté du mécanisme permet de lancer une simulation cinématique sur une certaine durée. La première fonctionnalité est de vérifier l'absence de collision entre les pièces durant son fonctionnement ou avec l'environnement. Quant à la simulation dynamique, elle est plus complexe et fait recours à des logiciels plus spécialisés.
- Pneumatique et hydraulique : dans Catia, les modules de pneumatique et d'hydraulique s'appuient sur des modules de schématique (représentation de câblage logique) et de *piping* (représentation des tuyaux).

7. Coût. Il existe aussi des modules de chiffrage de coût tels *Cost Advantage* de Cognition, compatible avec les logiciels CAO.

1.4.3.4 Modèle CAO, système idéal d'intentions de conception ?

D'emblée, il paraît évident que la modélisation CAO remplit la plupart des fonctions des croquis à main levée. En plus, elle comporte plusieurs fonctions supplémentaires parmi lesquelles on peut citer la précision dans la modélisation géométrique et les enregistrements suivant l'ordre et la logique de construction de la géométrie qui peuvent faciliter les modifications et la réutilisation. Cependant, malgré ces nombreuses fonctionnalités, les outils CAO ont encore besoin d'être perfectionnés pour soutenir tout le processus de conception. De plus, leur utilisation est encore très contraignante et limite la créativité du concepteur. Ce qui amène encore ce dernier à utiliser intensément les croquis à main levée, notamment dans les premières étapes du processus de conception. Dans cette thèse, nous avons, entre autres objectifs, de déterminer ces contraintes et de contribuer à définir un cadre qui permettrait de les limiter.

Par ailleurs, les systèmes CAO actuels sont construits autour de trois modules : le module des modèles, le module paramétrique et variationnel et le module du moteur

d'inférence. Qu'en est-il des modules d'historique et de raisonnement de conception ? Une bonne partie de cette thèse contribue à répondre à cette question.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous venons de faire un tour d'horizon des différents types de représentation en conception et leurs rôles. Il ressort que tous ces modes de représentation ne peuvent pas prendre idéalement en compte toutes les intentions de conception développées, d'où la nécessité de développer un système idéal d'intentions de conception. Les caractéristiques de ce système d'intentions de conception idéal ont été données. Nous avons ensuite adopté une approche descendante pour décrire la représentation par les modèles, jusqu'à la modélisation géométrique que nous avons estimée pouvant servir de base à la définition d'un tel système d'intentions de conception. Les différents modes de représentation géométrique ont été alors donnés et décrits.

Pour contribuer à la définition d'un système idéal d'intentions de conception à base des systèmes CAO, il est apparu important de comprendre le processus de conception fait à partir de ces outils. Pour y arriver, nous avons adopté une méthode expérimentale appelée « *Protocol Analysis* » par la communauté anglo-saxonne. La description de cette méthode fera l'objet du deuxième chapitre de cette thèse.

Chapitre 2

Méthode du *Protocol Analysis*

2.1 Introduction

2.1.1 Méthodologie de recherche en conception

2.1.1.1 Situation

L'exécution de notre projet de thèse a été influencée par un schéma traditionnel de recherche et développement que nous avons synthétisé sur la figure 2.1.

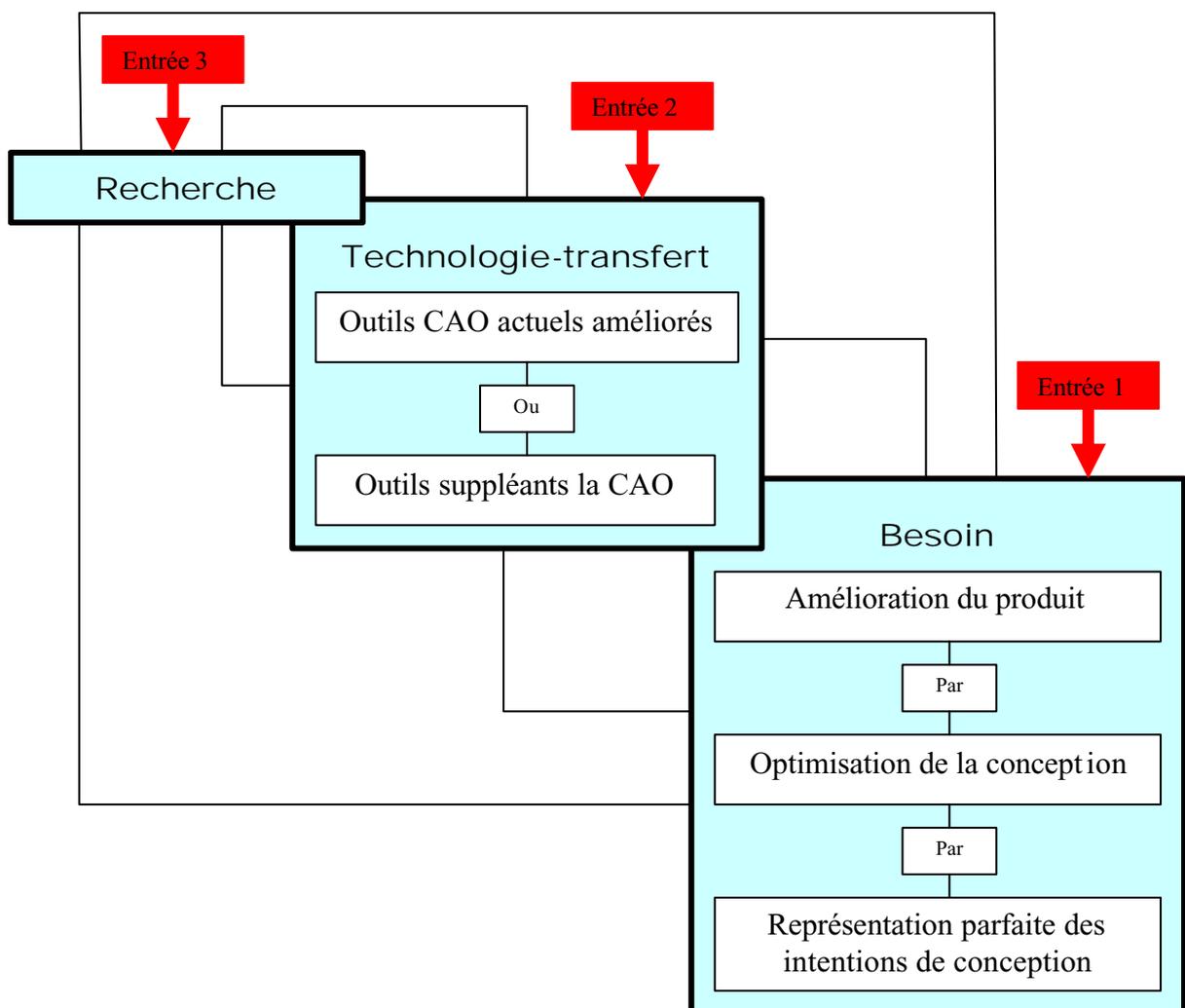


Figure 2.1 – Synthèse d'un schéma traditionnel de R & D

Cette figure présente trois secteurs dans un cycle de recherche et développement : la recherche, la technologie et le besoin. En principe, toute recherche vise à satisfaire un besoin. La technologie se situe à l'interface, entre la recherche et le besoin. La recherche se fait

usuellement en laboratoire avec quelquefois des extensions sur le terrain (industrie et utilisateurs ou usagers). La technologie destinée à l'utilisateur se développe le plus souvent en milieu industriel. Cependant, des prototypes destinés aux essais avant le lancement de la production peuvent se faire en laboratoire.

L'entrée dans ce cycle de la figure 2.1 peut se faire de trois manières :

- **Entrée 1** : on part d'un besoin exprimé par l'utilisateur. Ce besoin peut déclencher une recherche en vue de le satisfaire directement ou de définir les spécifications d'une technologie à cet effet. Le besoin peut aussi enclencher directement le développement d'une technologie sans au préalable passer par la recherche.
- **Entrée 2** : on part ici d'une technologie existante, qui peut satisfaire directement un besoin pour lequel elle n'était pas initialement destinée ou qui pousse les chercheurs à réfléchir à sa meilleure utilisation pour satisfaire un besoin donné, existant ou nouvellement défini.
- **Entrée 3** : c'est le cas classique où on part d'une recherche quelconque et on arrive à un résultat surprenant (très souvent par un hasard heureux) qui satisfait directement un besoin ou qui pousse à la spécification d'un outil pour la satisfaction d'un besoin.

Pour ce qui nous concerne, le besoin s'exprime par la nécessité d'améliorer le produit (essentiellement mécanique) par l'optimisation de sa conception. Cette nécessité part de l'imperfection des intentions de conception dans la représentation. Des interfaces technologiques (outils CAO) existantes essaient déjà de remplir cette fonction représentation des intentions de conception, mais avec des imperfections constatées, que nous montrerons expérimentalement dans le chapitre 5 de cette thèse. Pour satisfaire ce besoin exprimé, nous partons des outils existants en vue de contribuer à leur amélioration ou à la production de nouveaux outils capables de les suppléer. Pour ce faire, une recherche est nécessaire. C'est notamment dans cette partie recherche que nos travaux se sont concentrés. Ces derniers entrent dans une démarche générale de recherche développée au sein de notre équipe de recherche CID (Conception Innovante et Distribuée) du laboratoire M3M.

2.1.1.2 Démarche de recherche CID

La démarche adoptée entre dans un cadre défini au sein de notre équipe de recherche et explicitée dans [CHO 2004] et [PRU 2005]. Elle est décrite sur la figure 2.2.

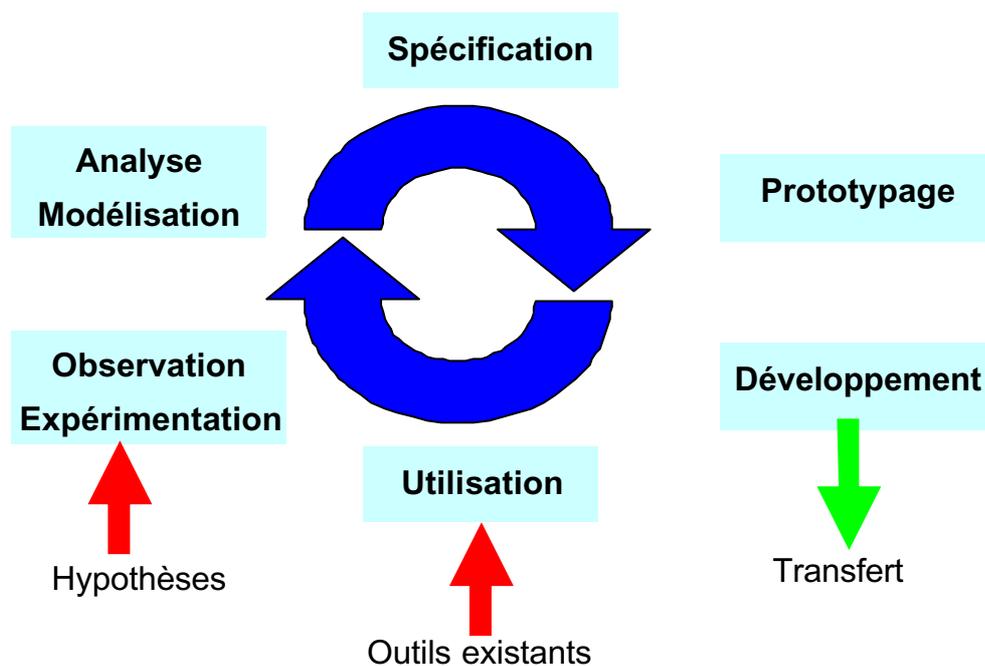


Figure 2.2 – Démarche de recherche CID [CHO 2004]

Cette figure présente une partie gauche et une partie droite avec une symétrie en terme de nombre d'éléments. Nos travaux sont inscrits dans la partie gauche. Cette dernière comporte quatre étapes principales : l'expérimentation, l'observation, l'analyse et la modélisation.

L'expérimentation est une épreuve qui consiste à découvrir des phénomènes nouveaux ou existants, à les étudier ou à vérifier des hypothèses. En conception, cette étape n'est pas encore bien maîtrisée par les chercheurs. Elle fait encore l'objet d'études sans qu'une unanimité ne se dégage pour une méthode particulière précise. Nous en avons choisi une (*protocol analysis*) qui a fait l'objet de nombreux débats ces dernières années. Cette méthode sera présentée dans les autres sections de ce chapitre. Elle est utilisée pour nos expérimentations présentées et commentées au troisième chapitre de cette thèse. Au niveau de l'expérimentation, beaucoup de données générées sont encore brutes. La question est de savoir lesquelles seront utiles pour notre recherche et de pouvoir efficacement les collectionner. C'est le rôle de l'étape d'observation.

L'observation est une étape qui vise à capter l'information. Tout moyen d'observation quel qu'il soit est un filtre, qui ne peut capturer que des informations d'un certain type. Il convient donc de définir les moyens adéquats pour extraire de l'expérience toutes les informations utiles pour l'analyse. À cette étape, on peut aussi ajouter la notion de validation. En effet, l'observation produit une validation de l'expérience. La meilleure façon de s'en convaincre est de considérer qu'une expérience peut être, à ce stade, jugée inadéquate. C'est donc une information filtrée et mise en forme qui sort de cette étape. C'est d'ailleurs si vrai

qu'il est parfois pertinent de reprendre des enregistrements bruts d'expériences déjà réalisées pour en extraire des informations qui n'avaient pas été faites.

L'étape suivante est l'analyse. L'objectif principal de l'analyse est d'extraire et représenter de façon synthétique les informations pertinentes pour une meilleure interprétation. C'est aussi une phase de filtrage d'informations. De la même façon que l'observation peut servir à valider l'expérimentation, l'analyse peut servir à valider l'observation. Nos expériences sont analysées dans les chapitres 4 et 5.

Les résultats de l'analyse peuvent conduire à la définition d'un modèle. La modélisation est l'opération par laquelle on établit une représentation synthétisée ou symbolisée d'un système complexe, afin de l'étudier plus commodément et d'évaluer les effets et les rôles de chacun de ses composants. L'étape de modélisation dans la démarche présentée vise soit à :

- généraliser à partir d'une analyse unique. On obtient un modèle générique construit sur un cas, donc non validé, mais peut être exploitable. Ce modèle peut utilement être confronté à d'autres résultats, commentaires, conclusions de la bibliographie ;
- conclure à une certaine légitimité du modèle (rappel toujours utile, un nombre important d'observations n'a pas valeur de preuve), si on dispose d'un nombre significatif d'analyses cohérentes entre elles ;
- valider un modèle construit antérieurement, par comparaison (c'est de l'évaluation).

Dans tous les cas, on vise par abstraction un niveau de généralité supérieur, avec l'ambition d'appliquer au cas général ce que l'on observe sur un ou des cas particuliers. Le modèle d'activité de conception à l'aide des outils CAO issu de nos analyses sera présenté au chapitre 4 de cette thèse.

Sur la base de la démarche précédente, la partie gauche, qui nous concerne le plus ici, est d'avantage explicitée et présentée sur la figure 2.3.

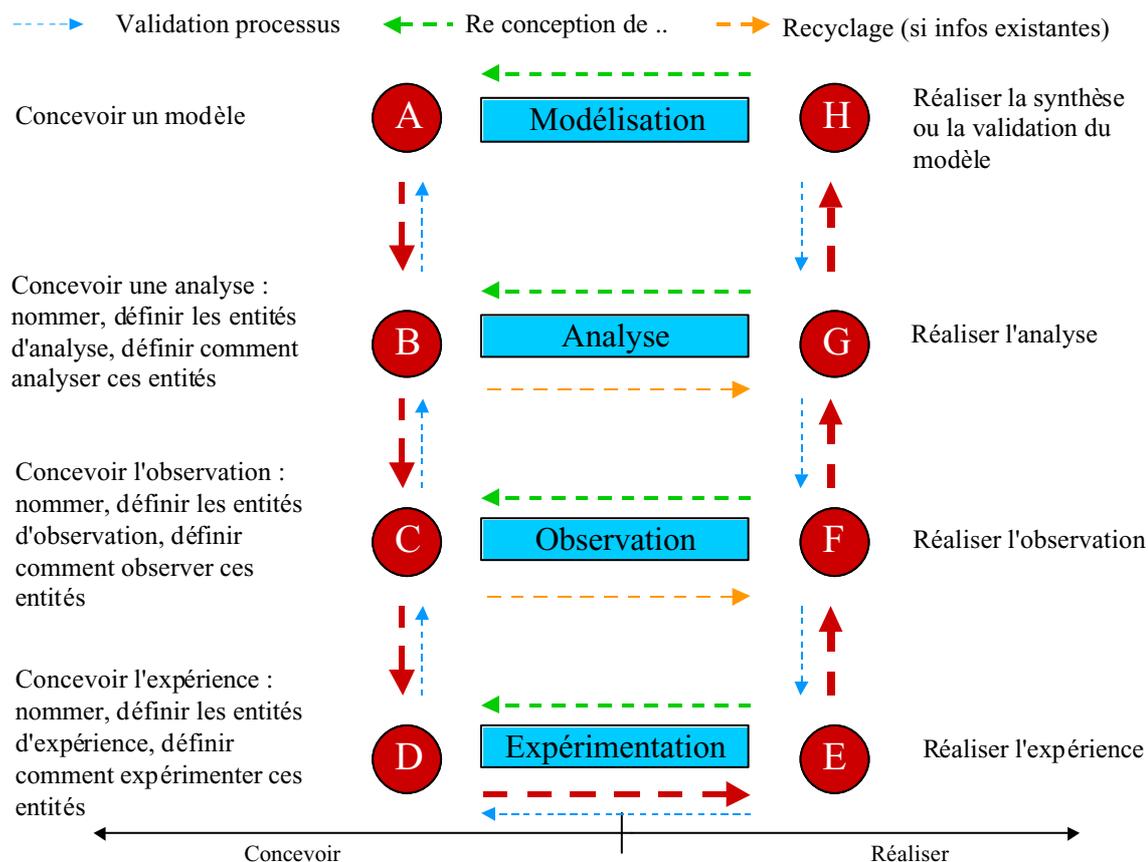


Figure 2.3 – Proposition d'une démarche de recherche en conception [CHO 2004]

Il s'agit d'une interrogation sur la manière de réaliser une expérience et sur les données à analyser. Il est décrit en quatre étapes de conception (A à D) et quatre étapes d'action / réalisation (E à H).

A : Concevoir un modèle

B : Concevoir une analyse : nommer, définir les entités d'analyse, définir comment analyser ces entités

C : Concevoir l'observation : nommer, définir les entités d'observation, définir comment observer ces entités

D : Concevoir l'expérience : nommer, définir les entités d'expérience, définir comment expérimenter ces entités

E : Réaliser l'expérience

F : Réaliser l'observation

G : Réaliser l'analyse

H : Réaliser la synthèse ou la validation du modèle

Après ce bref rappel de la démarche globale de notre équipe, nous allons à présent présenter la méthode particulière (*protocol analysis*) que nous avons utilisée pour l'application de cette démarche à nos travaux de recherche.

2.1.2 Définition et choix du *protocol analysis*

Après avoir défini nos objectifs, notre point d'entrée dans cette démarche de recherche fut l'expérimentation. Nous avons pour ambition d'analyser une séquence de conception dans laquelle le concepteur effectue ses représentations à l'aide d'outils CAO, afin d'en définir un modèle d'activité. De ce fait, nous avons besoin d'avoir accès aux pensées du concepteur pendant son travail. Nous avons estimé que la meilleure façon de le faire était de le pousser à les verbaliser au cours de son travail (verbalisation concurrente) et après son travail (verbalisation rétrospective). La méthode ainsi adoptée s'appelle *protocol analysis* par les anglo-saxons. Cette méthode a été décrite par Ericson et Simon [ERI 1993] et validée dans [CRO 1996], lors d'un atelier, comme une méthode d'analyse en conception. Les bases de cette validation nous ont confortés dans le choix de cette méthode. L'atelier en question avait permis de créer des groupes de chercheurs distincts en conception et de faire la comparaison des résultats des analyses qu'ils avaient faites, distinctement, chacun de son côté, sur la base des mêmes données issues d'une même expérience. Ceci avait pour but de :

- avoir une vue d'ensemble des connaissances accumulées sur la conception et des chercheurs en conception ;
- chercher un langage commun pour le *protocol analysis* en vue de détailler les processus de conception ;
- valider le *protocol analysis* comme une technique de recherche ;
- avoir une discussion sur les propriétés et les limites du *protocol analysis* dans le domaine de recherche en conception ;
- discuter des voies possibles d'utilisation de la méthode du *protocol analysis* dans le futur, seule ou en combinaison avec d'autres techniques de recherche ;
- former une base de réseau international de recherche et une plate-forme pour une discussion sur ces sujets.

Aujourd'hui, l'utilisation de cette méthode pour améliorer la compréhension du processus de conception est en plein essor dans la recherche en conception [BAY 1996]. Le processus de conception est très complexe et il est très facile de rencontrer des difficultés dans son analyse à cause du grand nombre de variables qui affecte les résultats. Le dispositif expérimental, le choix et le nombre d'acteurs, leur expérience et leur culture, la tâche de conception et le domaine de cette tâche, etc. influencent tous le résultat des études de protocoles [CRO 1996]. Le *protocol analysis* permet, entre autres, aux chercheurs de réduire

la complexité du processus de conception, dans un environnement contrôlé, pour atteindre le but de leur recherche. Essentiellement, elle se fonde sur les comptes-rendus verbaux donnés par les acteurs de leurs propres activités cognitives. Elle est centrée sur l'analyse de la verbalisation des acteurs. Elle relie ainsi les paroles aux activités cognitives. Cette méthode a été utilisée à cet effet, car il est difficile d'imaginer comment on pourrait examiner les réflexions et raisonnements des personnes, autrement qu'en leur demandant de verbaliser ce qu'elles pensent ou ce qu'elles ont pensé. Naturellement, c'est une tâche toujours difficile jonchée de nombreuses difficultés. La définition d'une procédure appropriée est donc nécessaire pour l'application de la méthode.

Pendant l'exécution de la méthode, on effectue l'enregistrement de tous les éléments auditifs et visuels qui se produisent pendant la session expérimentale. L'analyse des rapports de la verbalisation et de la visualisation se trouve au centre de la méthode.

Deux façons d'exécuter la méthode du *protocol analysis* permettent d'avoir les données de bases : les comptes-rendus verbaux rétrospectifs et les comptes-rendus verbaux concourants. Parmi les données verbales concourantes, on distingue la méthode de la pensée à haute voix (*Concurrent Think Aloud* - CTA) et la méthode de la verbalisation sociale.

2.1.3 Historique de la méthode du *protocol analysis*

Avant l'introduction du *protocol analysis* en conception, des méthodes de recherche variées ont été développées et adoptées pour l'analyse de l'activité de conception. Ces méthodes s'étendent des réflexions philosophiques aux investigations empiriques et incluent l'étude de l'intelligence naturelle et artificielle appliquée à la conception. Certaines de ces méthodes sont présentées dans [CRO 1992].

L'analyse des protocoles du *Think Aloud* émerge comme une méthode de recherche psychologique dans les années 1920. Au début, c'était une méthode de compréhension de la résolution des problèmes. Ces premières études sont cependant limitées à l'habilité des chercheurs à prendre des notes précises de la verbalisation du sujet. Ce n'est qu'après 1945, avec la disponibilité des magnétophones, que des méthodes plus précises de collecte de données verbales ont été développées et ont permis des études plus précises et moins sélectives d'être entreprises. Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1960 que les premières études majeures de protocole sont faites. Notamment, les analyses de protocole de TA sont utilisées par [DEG 1965] dans ses études sur les jeux d'échecs et par [NEW 1972] dans leurs études sur la résolution des problèmes arithmétiques et logiques.

Dans les années 1970, la disponibilité des enregistrements vidéo lui donne une nouvelle dimension dans laquelle le comportement non verbal peut être étudié parallèlement au rapport verbal. L'une des premières études est faite par [EAS 1990] dans le domaine architectural.

Depuis lors, l'utilisation de la méthode dans ce domaine a continué à être un sujet riche [FOZ 1973 ; AKI 1978 ; ECK 1988 ; KLE 1989 ; CHA 1990 ; GOL 1990 ; GOL 1991].

Ce n'est qu'à la fin des années 1980 que les études de protocole en ingénierie de conception (*Engineering Design*) commencent à apparaître [ULL 1988 ; WHI 1989 ; ADE 1989 ; BAL 1990 ; MCG 1992 ; CHR 1992]. Bien que les méthodes conventionnelles du *protocol analysis* soient largement utilisées pour des études où un seul sujet est utilisé, une particularité significative des études en ingénierie de conception a été leur extension à la méthode d'analyse de l'activité d'équipe de conception (travail en collaboration) [TAN 1991 ; MIN 1993 ; VIS 1993 ; OLS 1992].

En 1993 et 1994, Ericsson et Simon [ERI 1993] puis Van Someren *et al.* [VAN 1994] présentent et décrivent succinctement la méthode. À partir de là, plusieurs investigations sont faites en conception [MCN 1994 ; AKI 1995 ; DOR 1995 ; LLO 1995]. Cependant, il n'a pas été facile de faire une comparaison générale, ni même d'avoir un accord sur les procédures générales et standard d'utilisation de la méthode, à cause de leur nature dispersée et indépendante des chercheurs ayant entrepris de l'utiliser. C'est pour cette raison qu'en 1996, un atelier de Delft [CRO 1996], déjà mentionné, a été organisé pour valider la méthode du *protocol analysis* comme une méthode d'analyse des activités de conception et fixer ses bases. Dès lors, cette méthode est librement utilisée par plusieurs auteurs et distinctement dans plusieurs disciplines de la conception [SUW 1996 ; SUW 1997 ; GER 1998 ; SUW 1998 ; GER 2001 ; KAV 2001 ; KAV 2002 ; BOZ 2003 ; PEN 2003 ; KUA 2005 ; KUA 2006a ; KUA 2006b].

Malgré cette large utilisation, les techniques utilisées jusqu'à présent pour la collecte et l'analyse des données sont encore subjectives, car il n'existe pas de standard. Par ailleurs, des travaux sont encore nécessaires pour exclure ou maîtriser certains éléments non encore sous contrôle de ces techniques. Parmi ces éléments, on peut citer : l'expérience des acteurs, la nature du problème de conception utilisé, la façon d'exécuter les expériences, l'influence de la présence des expérimentateurs sur les acteurs et sur les analyses, etc. Ces éléments non maîtrisés rendent encore difficile la généralisation des conclusions qui résultent des analyses. Ce chapitre et une bonne partie du troisième chapitre visent à apporter une contribution à la consolidation de la méthode dans l'analyse des activités de conception, notamment mécanique.

2.1.4 Plan d'exécution du *protocol analysis*

Nous avons estimé important de synthétiser la procédure classique pour son exécution sur la figure 2.4, et qui devait servir par la suite de cadre dans le montage et l'analyse de nos expériences.

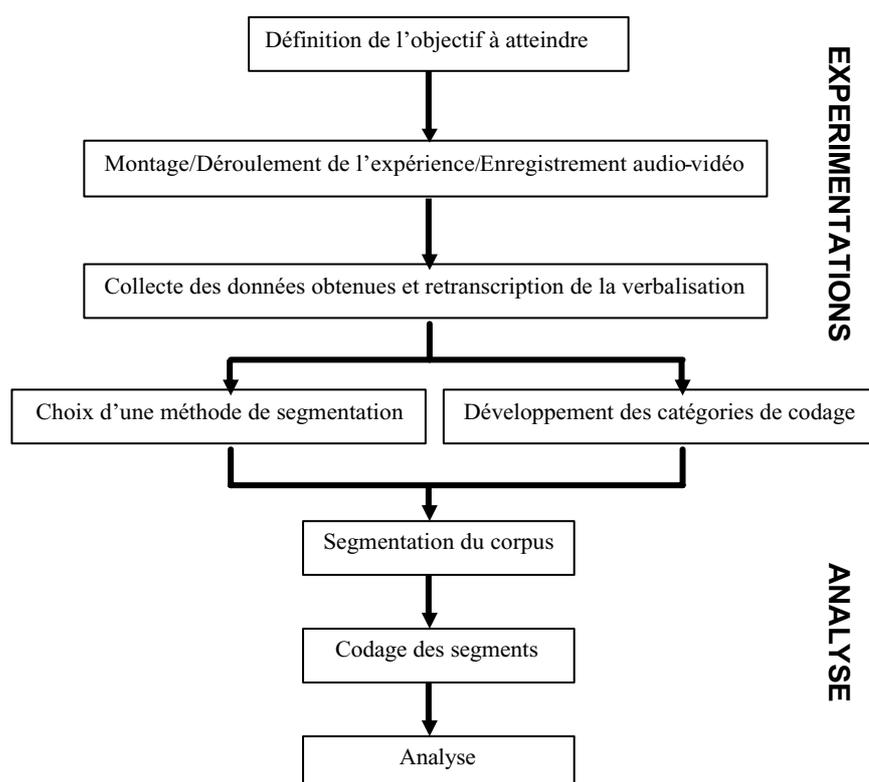


Figure 2.4 – *Plan classique d'exécution du protocole analysis*

Ce plan d'exécution comprend deux parties :

- le déroulement des séances expérimentales ;
- le déroulement des analyses.

La partie expérience va de la définition des objectifs à la collecte des données pour l'analyse, en passant par la définition du problème de conception, la définition des moyens d'observation, la définition du type de verbalisation à utiliser, la verbalisation et la production des données brutes issues du travail de conception lors de l'exécution des expériences.

La partie analyse va de l'organisation des données dans une forme facile à analyser, à l'analyse proprement dite qui conduira aux interprétations et éventuellement à la définition d'un modèle ou des spécifications d'outils.

Ces différentes parties de la procédure sont définies dans ce chapitre en rapport avec la bibliographie. Les étapes seront ensuite appliquées à nos expériences (chapitre 3) et à nos analyses et résultats (chapitre 4 et 5). Pour ce faire, nous commençons par décrire les méthodes utilisées dans la partie expérimentation et dans la partie analyse.

2.2 Méthodes expérimentales

Dans cette section, nous insisterons sur le choix des acteurs, du problème de conception et nous décrirons les différents types de verbalisation qui peuvent être utilisés et leurs caractéristiques en rapport avec la bibliographie.

2.2.1 Critères de choix du problème de conception

Le choix et le cadre précis du problème de conception sont cruciaux dans la définition du type de la méthode du *protocol analysis*. Les chercheurs, à cette étape de travail, ont besoin de beaucoup de temps, de soins et d'efforts pour produire un sujet de conception qui sera approprié à leurs buts de recherche.

Ainsi, Dorst [DOR 1996] définit des exigences de la tâche dans le problème de conception pour l'expérience. Cette tâche doit être :

1) Un challenge

Le concepteur doit travailler sur un produit totalement nouveau. On lui donnera l'idée de base en termes plutôt abstraits. Même dans les cas d'une reconception, la tâche doit donner l'impression d'un nouveau problème de conception. Ceci veut dire que le concepteur ne doit pas avoir au départ une idée claire de ce à quoi le produit peut ressembler.

2) Réaliste

Réalisme dans ce cas signifie que l'idée du produit et toutes les informations viennent de la vie réelle et que les sujets sont mis dans une situation réaliste. On peut donner aux concepteurs un problème industriel réel reformulé et mis sous forme de problème de conception pour l'expérience, ou un problème de laboratoire qui donnera l'impression que le sujet est issu d'un problème industriel réel. Ils doivent être convaincus que le fruit de leur travail servira à quelque chose.

3) Appropriée aux acteurs

Le problème doit pouvoir être entièrement traité dans une petite séance de conception et avec le matériel disponible. Les acteurs doivent être choisis pour leurs compétences générales en conception en rapport avec le problème à traiter. On leur demandera essentiellement de faire quelque chose dans laquelle ils auraient montré leur compétence. Cependant, l'idée du produit introduit dans ce problème doit être suffisamment innovante pour être sûr qu'ils n'ont probablement pas eu d'expérience sur quelque chose de similaire.

4) De taille et de contenu facilement explicable aux acteurs

Le problème doit être limité à une taille telle qu'il soit facile à expliquer au concepteur, de façon à ce qu'il assimile complètement les contours. On doit donner l'information de manière la plus concise possible. Parfois, il est préférable de la fournir dans le contexte d'un produit similaire, lequel sera analysé et évalué dans un nouveau contexte. L'évaluation peut servir à éclairer les aspects qui sont réellement importants pour la tâche et prédire quelles pourront être les futures difficultés. C'est ce qui a été fait dans le problème de conception lors de l'atelier de Delft [CRO 1996]. Lorsqu'ils travaillent avec une description abstraite du problème, les concepteurs semblent avoir plus de difficultés, et peuvent juger même insurmontables certaines d'entre elles. Ainsi, le rapport avec un produit similaire peut se révéler vital. Par ailleurs, la taille du sujet doit être telle que l'analyse de l'expérience ne soit pas très lourde. Cependant, elle doit avoir une grandeur et un contenu tel qu'on puisse trouver dans le sujet tous les éléments qui pourraient apparaître dans un projet de conception.

5) Faisable dans le temps alloué

Le problème doit être tel que sa faisabilité soit certaine dans le temps imparti pour atteindre le but fixé. On doit s'assurer qu'on a une image assez concrète de ce qu'on espère produire, mais aussi s'assurer que des idées et une analyse de problème peuvent facilement être faites dans la limite du temps imparti. Le but d'une séance de conception doit être de fournir des concepts dans un niveau suffisamment détaillé, pour servir de base à une discussion, permettant ainsi à d'autres concepteurs d'avoir un bon jugement de la solution.

6) Dans la sphère de connaissance des concepteurs

On peut admettre aussi que les concepteurs ont eu à traiter des problèmes de conception qui intègrent les buts recherchés ou tout au moins avoir les compétences dans les domaines de métiers qui interviendront dans la résolution du problème de conception.

N'ayant pratiquement pas rencontré de travaux qui soulignent la façon dont un problème pour une expérience de conception doit être défini, du moins en ce qui concerne le *protocol analysis*, nous avons adopté ces critères énoncés par Dorst [DOR 1996] comme référence et nous en avons tenu compte pour définir notre problème de conception qui sera explicité dans le troisième chapitre de cette thèse. Pour le moment, il convient de décrire la suite de la procédure du *protocol analysis* par les méthodes de verbalisation qui y sont utilisées.

2.2.2 Verbalisation

L'activité de verbaliser la pensée n'est pas entièrement étrangère à la vie de tous les jours et presque tous les acteurs ont probablement eu quelques expériences à ce sujet.

Pour caractériser les différences entre les différentes méthodes de verbalisation, Ericsson et Simon [ERI 1993] décrivent différents niveaux dans lesquels l'acteur peut verbaliser le processus de ses pensées et leurs contenus :

- **niveau 1** : ce premier niveau de verbalisation concerne les codages oraux directs de l'exécution de la tâche. À ce niveau, il n'y a pas de processus intermédiaire, et l'acteur n'a pas besoin de faire des efforts spéciaux pour communiquer ses pensées. Une distinction doit être faite cependant entre l'acteur qui communique directement avec lui-même et celui qui veut communiquer avec d'autres personnes. Les verbalisations pour soi-même sont plus idiomatiques et utilisent plus de référents particuliers que la verbalisation destinée à d'autres personnes [WER 1963].
- **niveau 2** : ce deuxième niveau de verbalisation implique la description et/ou plutôt l'interprétation du contenu de la pensée. Cette description ou cette interprétation exige un temps de traitement, mais n'influe pas sur les mécanismes impliqués dans l'exécution de la tâche de résolution du problème posé. Un acteur qui verbalise à ce niveau prend plus de temps qu'un autre qui ne verbalise pas. Cependant, Ericsson et Simon [ERI 1993] supposent que de pareilles traductions ne changent pas la structure du processus d'exécution de la tâche principale. Un exemple de ce type de verbalisation se produit quand l'acteur est appelé à faire une description ou une interprétation d'une image visuelle en verbalisant. Un processus intermédiaire intervient dans la transformation des éléments visuels en éléments verbaux alors qu'au premier niveau de verbalisation, il dit directement ce qu'il pense.
- **niveau 3** : on est au troisième niveau de la verbalisation quand les acteurs expliquent leurs pensées ou leurs processus de pensée. Une explication des idées, des hypothèses ou leurs motifs n'est pas simplement une restitution du contenu de la pensée, mais elle exige la liaison d'une information verbalisée et celle qui l'a précédée en vue de rendre la verbalisation plus cohérente et compréhensible par d'autres personnes.
- **niveau 4** : ce quatrième niveau de verbalisation intervient quand l'acteur est appelé à verbaliser ses pensées après avoir fini d'exécuter les tâches de résolution du problème posé. Les deux processus ne se font donc pas au même moment.

Ces quatre niveaux de verbalisation sont regroupés en deux types :

- la verbalisation concurrente ;
- la verbalisation rétrospective.

Lors de la verbalisation concurrente, l'acteur verbalise en exécutant la tâche. Ce type de verbalisation contient la verbalisation concurrente de la pensée, connu sous le nom de *Concurrent Think Aloud* (CTA), et la verbalisation sociale. Le CTA concerne les niveaux 1 et

2 de la verbalisation décrite précédemment et la verbalisation sociale concerne le niveau 3. Elles seront décrites plus en détail dans la section 2.2.2.2.

En ce qui concerne la verbalisation rétrospective, l'acteur achève la résolution du problème et est amené quelques instants plus tard à verbaliser les pensées qu'il a eues. Ce type de verbalisation se nomme *Retrospective Think Aloud* (RTA) et concerne le niveau 4 de verbalisation décrit précédemment. Il sera explicité à la section 2.2.2.3.

Les deux types de verbalisation utilisés usuellement dans le *protocol analysis* seront décrits selon les concepts du modèle de traitement cognitif d'information développés par Ericsson et Simon [ERI 1993]. Il est important de synthétiser ces concepts ici pour une meilleure compréhension de l'explication des méthodes de verbalisation.

2.2.2.1 Modèle de traitement cognitif de l'information pour la verbalisation [ERI 1993]

Le modèle de traitement cognitif de l'information que nous présentons ici s'inspire des travaux d'Ericsson et Simon [ERI 1993]. Ce modèle aidera à interpréter les données verbales obtenues des acteurs, ainsi que les relations qui existent entre ces données et ses autres comportements pendant l'exécution des tâches de résolution du problème posé. La définition de ce modèle est partie sur une base simple. Le processus cognitif est considéré comme une séquence d'états internes successivement transformés par une série d'informations préalablement traitées. On suppose ensuite que les informations peuvent être stockées dans plusieurs mémoires ayant des capacités et des caractéristiques différentes. Elles peuvent être stockées dans une mémoire à faible capacité et donc pour une courte durée, mais facilement accessible ou dans une autre mémoire ayant une capacité beaucoup plus grande, mais dont l'accès n'est pas toujours facile. La première s'appelle mémoire à court terme et la deuxième mémoire à long terme. Ainsi le modèle de traitement cognitif de l'information proposé par Ericsson et Simon [ERI 1993] comportent trois parties essentielles : le processeur central et les deux mémoires ci-dessus mentionnées.

Le processeur central correspond au centre de raisonnement et de réflexion. C'est dans cette partie que l'information est traitée et convertie avant stockage. Pour effectuer son travail de traitement, il a besoin des informations qui sont captées par les organes sensitifs ou qui sont disponibles dans les mémoires à court terme ou à long terme.

Pour avoir accès à l'information présente dans la mémoire à long terme, l'acteur a besoin de stimuli et/ou d'un processus intermédiaire qui l'aideront à se rappeler de ces informations. Quand ceci est fait, l'information repasse par la mémoire à court terme et est directement accessible pour la verbalisation ou pour un prochain traitement.

La mémoire à court terme peut être considérée comme la mémoire active dans laquelle le processeur central a besoin de stocker les résultats intermédiaires de ses traitements, de telle sorte qu'ils soient constamment à sa portée quand il en aura besoin pour un autre traitement.

L'information présente dans cette mémoire peut être verbalisée sans oublis. Cependant, elle a une capacité limitée et transfère au fur et à mesure l'information en surplus dans la mémoire à long terme supposée être capable d'enregistrer de façon illimitée.

Certaines théories considèrent la mémoire à court terme comme une partie de la mémoire à long terme qui est constamment activée [AND 1976]. Mais ceci n'altère en rien le principe de fonctionnement décrit précédemment.

Nous supposons que la verbalisation de la pensée sera basée sur un sous-ensemble d'informations contenu dans la mémoire à court terme et dans la mémoire à long terme. Avec la description de ce modèle de traitement d'information, nous pensons être déjà en mesure d'expliquer de façon plus compréhensible les différents types de verbalisation.

2.2.2.2 Verbalisation concourante de la pensée

Au cours de la verbalisation concourante, l'acteur verbalise en exécutant au même moment les tâches de résolution du problème. Dans ce cas, il peut s'agir juste de la verbalisation de ce qu'il pense (*Concurrent Think Aloud* ou CTA) ou de l'explication de ses pensées (verbalisation sociale). Ce sont les deux modes de verbalisation concourante.

Dans le cas où le sujet ne verbalise que ses pensées pendant l'exécution de la tâche, la séquence de ses pensées n'est pas changée. Cependant, lorsqu'il est appelé à décrire, expliquer ou justifier ses pensées, cette séquence change parce que le sujet doit rechercher et s'occuper de l'information additionnelle qui n'est normalement pas nécessaire pour accomplir la tâche. Dans cette seconde situation, il cherche à communiquer et à se faire comprendre par d'autres personnes alors que dans la première il ne verbalise que ses pensées pour lui-même comme s'il était seul. Les explications, les descriptions, les justifications sont des verbalisations socialement motivées qui se produisent pour communiquer à des auditeurs. Un processus additionnel est alors nécessaire pour une bonne cohérence dans l'articulation afin de mieux se faire comprendre.

En résumé, la méthode du CTA dans la terminologie anglo-saxonne consiste à demander au concepteur de ne verbaliser que ses pensées sans explication ni justification comme s'il s'adressait à lui-même, tandis que la verbalisation sociale a pour but de communiquer avec l'extérieur ; de ce fait, elle exige d'expliquer et de justifier les pensées.

Cette classification de la verbalisation concourante en deux types est aussi pointée par Vygotsky [VYG 1986] et Goldschmidt [GOL 1996] qui parlent de discours intérieur et de discours extérieur. Selon eux, le discours intérieur n'est pas une forme pré-linguistique de raisonnement, mais un aspect sémantique de la parole abrégée, dans laquelle l'acteur se concentre sur l'exécution de la tâche et a tendance à y omettre une phrase et des mots qui lui sont connectés. L'ensemble de la verbalisation perd une partie de sa cohérence. À l'opposé du discours intérieur, le discours extérieur est destiné à d'autres personnes. C'est comme une

conversation. La cohérence est recherchée dans les paroles qui sont prononcées afin d'améliorer la communication. Le CTA est une forme de discours intérieur et la verbalisation sociale est une forme de discours extérieur.

Dans cette section, nous nous intéresserons beaucoup plus à la méthode de la verbalisation concourante de la pensée qui a été utilisée dans nos expériences. Ce type de verbalisation est exigé quand on veut étudier le comportement des sujets ou le processus de leur pensée. À cet effet, il faut faire en sorte de minimiser ou d'éliminer les effets de la verbalisation sociale. Pour cela il faut au préalable caractériser clairement les tâches. Une justification à ce sujet est donnée par Garner [GAR 1987] qui a réalisé une expérience dans laquelle la verbalisation de la pensée est demandée aux acteurs, dans une situation où la tâche est vague. Il est apparu, sous ces conditions, que les acteurs ont passé plus de temps à produire une meilleure définition de la tâche qu'à résoudre le problème. Garner se rend compte que cette procédure de définition spécifique de la tâche est alors influencée par des facteurs sociaux étrangers. Ils concluent alors qu'une caractérisation claire des tâches est nécessaire pour optimiser la performance des protocoles de CTA demandés.

De plus, il n'est pas toujours facile d'amener l'acteur à ne verbaliser que ses pensées. Ainsi, lors de l'application de la méthode du CTA, on remarque certains inconvénients tels que :

- l'existence d'effets sur le comportement et les performances cognitives du sujet lors de la verbalisation concourante ;
- les sujets peuvent faire une verbalisation incomplète de leurs activités cognitives ;
- les sujets peuvent inclure inconsciemment des rapports verbaux qui sont indépendants des pensées réelles employées dans la tâche.

L'élimination de ces effets non désirables est un véritable challenge. Ils dépendent des caractéristiques des tâches et des instructions données au sujet pour la verbalisation. Les études sur ces effets de la verbalisation dans [ERI 1993] et repris dans [GER 2001] montrent que le rapport de CTA et le rapport rétrospectif n'influencent pas la séquence des pensées. Le CTA tend à augmenter le temps de production des solutions, surtout à cause du temps exigé pour la verbalisation. Pour les tâches de longue durée, les protocoles de CTA paraissent plus fiables que ceux rétrospectifs. Cependant, la verbalisation de CTA peut retarder les changements de stratégie.

Les effets non désirables dans les protocoles du CTA seraient dus aux interférences avec la verbalisation sociale. En effet, Ericsson et Simon [ERI 1993] proposent des instructions pour empêcher ou tout au moins pour diminuer de tels effets. Cependant, Boren et Ramey [BOR 2000] ont observé que ces directives strictes prescrites par Ericsson et Simon, avec un expérimentateur qui reste en arrière-plan et rappelle seulement aux acteurs de continuer à penser à haute voix chaque fois qu'ils marquent une longue pause ou basculent

dans la verbalisation sociale, sont à peine observées en pratique. Ils proposent donc un paradigme de « communication de discours » qui donne plus de liberté à l'expérimentateur pour interagir avec les acteurs. Des années plus tôt, Wright et Monk [WRI 1991] étaient arrivés à des conclusions semblables par comparaison expérimentale de plusieurs protocoles de CTA qui ont pratiquement tous échoués parce qu'aucun des expérimentateurs ne s'est comporté strictement selon les directives prescrites.

L'influence de la verbalisation a aussi été constatée pour les cas où les tâches expérimentales étaient essentiellement perceptuelles-motrices ou exigeaient un codage visuel avant la verbalisation. Lloyd *et al.* [LLO 1995] soutiennent bien cet état de fait en ajoutant que certains aspects du processus de conception peuvent ne pas être révélés par la verbalisation concurrente.

Par ailleurs, Maake *et al.* [MAA 2003] indiquent que les exigences de penser à haute voix pourraient produire la réactivité, c'est-à-dire, qu'elle peut affecter la façon qu'ont les acteurs à traiter une tâche, le temps qu'ils prennent pour l'exécuter et leur éventuel succès de l'achever. Cependant, d'autres études [LOX 1994] montrent que le CTA a un effet positif sur l'exécution de la tâche.

Pour éviter l'introduction de la verbalisation sociale dans les protocoles de CTA, plusieurs tentatives ont été faites. Il est préconisé dans un premier temps que les expérimentateurs ne soient pas visibles par l'acteur pendant le protocole. Ils peuvent par exemple se mettre derrière lui ou le laisser seul avec le matériel nécessaire pour enregistrer tout ce qui s'est passé. Ensuite, l'instruction du CTA doit être aussi explicite que possible pour empêcher les acteurs d'être tentés d'expliquer ou de décrire leur verbalisation. De plus, il doit être demandé explicitement à l'acteur de se concentrer exclusivement sur l'exécution de la tâche pendant le protocole, car ce n'est que dans ces conditions que la séquence des pensées peut être semblable à celles produites en exécutant la même tâche dans le silence. Enfin, on peut lui donner au préalable des exercices d'entraînement dans lesquels il est facile de verbaliser simultanément pour lui permettre de se familiariser avec la procédure du CTA avant le début de l'expérience [ERI 1993 ; GER 2001].

Malgré toutes les précautions prises pour permettre aux acteurs de ne verbaliser que leurs pensées et ne pas compromettre la procédure du CTA, ils sont sans cesse tentés d'utiliser des séquences de pensées additionnelles pour rendre plus cohérente leur verbalisation. Ainsi, certains chercheurs déclarent que le CTA interfère avec les processus de pensée et certains aspects du processus de conception pourraient ne pas ressortir ou pourraient être changés [LLO 1995 ; RUS 1989].

Ainsi, les verbalisations concurrentes, à l'opposé des verbalisations sociales, manquent souvent de cohérence et contiennent des séquences fréquemment disjointes avec des relations implicites entre les pensées. Les protocoles de CTA ne disent pas toujours comment la

solution est générée en détail, ni pourquoi une méthode est adoptée parmi tant d'autres possibles. Au contraire, la verbalisation sociale fournira bien des réponses à toutes ces questions. Cependant, elle va altérer le processus normal de la pensée. Dans une partie de nos expériences (détaillée au chapitre 3), nous avons voulu garantir une correspondance étroite entre le protocole verbal et le processus réel utilisé pour exécuter la tâche. Nous avons choisi l'utilisation de la méthode du CTA. Des dispositions ont été prises pour « forcer » la pensée à haute voix par des rappels d'instructions courtes de la part des expérimentateurs, de façon à pousser les acteurs à résister à toutes les tentations de rechercher la cohérence et la perfection dans la verbalisation.

2.2.2.3 Verbalisation rétrospective de la pensée

La verbalisation rétrospective de la pensée (*Retrospective Think Aloud* ou RTA) permet d'avoir accès à l'information en deux temps : pendant et après l'exécution de la tâche. Le sujet exécute d'abord les tâches de résolution de problème et ce n'est qu'après qu'il verbalise les pensées qu'il a eues. Ericsson et Simon [ERI 1993] supposent qu'un sous-ensemble des pensées qui se produisent pendant l'exécution des tâches est stocké dans la mémoire à long terme sous une forme recouvrable. Le RTA implique la récupération de ces données stockées et leur verbalisation. Pour les tâches qui viennent d'être exécutées, l'information peut être encore dans la mémoire à court terme et peut être correctement recouverte avec précision. Cependant, le contenu de la mémoire à court terme est régulièrement écrasé par de nouvelles informations. De ce fait, l'information recouvrable dans cette mémoire doit être encore fraîche. Ainsi, Ericsson et Simon [ERI 1993] prévoient que pour une tâche qui s'est exécutée il y a moins de 10 minutes, les acteurs sont capables de se souvenir de la séquence réelle de leurs pensées avec une grande exactitude et perfection. Pour ces tâches, les rapports rétrospectifs sont même plus complets que les rapports concourants, car ils ne présentent pas de difficulté pour la verbalisation des séquences rapides, comme dans le cas des rapports concourants. Cependant, quand la tâche a été exécutée il y a plus longtemps, l'information est préservée partiellement dans la mémoire à court terme et partiellement stockée dans la mémoire à long terme. Comme les caractéristiques de la mémoire humaine ne lui permettent pas de recouvrer entièrement l'information stockée dans la mémoire à long terme sans oubli, des données peuvent être restituées en omettant des détails, ou peuvent être produites par un raisonnement supplémentaire. En conséquence, plusieurs auteurs ont préconisé l'utilisation de la vidéo pour enregistrer toute la session de la conception et pour assister le concepteur pendant la rétrospection [SUW 1998 ; GER 2001 ; MAA 2003]. Même jusque là, aucune garantie n'existe pour que le sujet se souvienne de toutes les informations enregistrées dans la mémoire à long terme, mais on est certain qu'il recouvrera une bonne partie de cette information qui ne l'aurait pas été si la bande vidéo n'était pas utilisée.

En général, les rapports rétrospectifs peuvent être préférés aux rapports concourants dans le cas où la tâche à exécuter est perceptuelle-motrice avec beaucoup de contraintes en temps réel, surtout dans des situations où un ralentissement, même modeste, dû à la verbalisation simultanée, peut être désastreux.

Peu de travaux que nous avons rencontrés ont utilisé uniquement la méthode de verbalisation rétrospective dans leur expérience. De plus, la plupart servaient surtout de comparaison avec la méthode concourante.

La première différence apparente entre le CTA et le RTA réside dans leur mode de déroulement. Gero et Tang [GER 2001] ont discuté de cette différence dans leurs travaux. Ils font des expériences dans lesquelles les sujets sont des étudiants de troisième année de l'Université de Technologie de Sydney. Pour obtenir les protocoles concourants et rétrospectifs à partir d'une simple session, ils utilisent 4 phases : exercices d'entraînement, verbalisation de la pensée à haute voix pendant la conception (CTA), verbalisation rétrospective de la pensée après la conception (RTA) et entretien final. Deux exercices d'entraînement sont utilisés pour habituer le sujet à la méthodologie. Pendant la rétrospection, la bande vidéo de la session de conception est utilisée. Les expériences indiquent quelques différences entre les deux types de protocoles.

Premièrement, les protocoles concourants semblent donner plus d'informations au début du processus de conception, spécialement quand les sujets essaient de percevoir le problème. Dans les protocoles rétrospectifs, les sujets peuvent ne pas se souvenir de certains éléments, même avec l'aide de la vidéo.

Deuxièmement, pendant les protocoles concourants les sujets marquent parfois des pauses dans leur discours. Ces pauses sont vues comme des transitions de l'attention ou des pensées non verbales dans les études précédentes. Il n'y a pas beaucoup d'informations fournies par le protocole concourant au sujet de ces pauses. Cependant, il est possible de trouver quelques informations sur ces pauses dans le protocole rétrospectif parce que les sujets peuvent se rappeler parfois le processus de leur pensée dans cette période. Ces périodes de pause arrivent bien souvent quand le concepteur dessine ou examine ses dessins ou croquis intensivement.

Troisièmement, ils constatent que les protocoles rétrospectifs sont plus longs que les protocoles concourants. Mais cette longueur n'indique pas directement que les protocoles rétrospectifs fournissent plus d'information que les protocoles concourants.

Théoriquement, il existe donc des avantages et des inconvénients à utiliser des protocoles du RTA ou du CTA. Un avantage du RTA sur le CTA réside dans la diminution possible de la réactivité, c'est-à-dire que les participants sont entièrement capables d'exécuter une tâche de manière libre sans influence avant de passer à la verbalisation [MAA 2003]. Un second avantage concerne l'enregistrement du temps de travail par tâche, qui est possible dans

le cas de protocoles de RTA, mais qui ne serait pas utile dans le cas de protocoles de CTA, puisque l'exigence de penser à haute voix est supposée ralentir le processus de conception de façon variable et non mesurable.

L'utilisation de protocoles du RTA au lieu de protocoles du CTA a quelques inconvénients. Un des inconvénients est lié aux durées des sessions expérimentales qui sont considérées plus longues que pour les protocoles du CTA, car les acteurs prennent du temps pour exécuter leur travail et en prennent d'avantage pour verbaliser rétrospectivement. Un autre, plus important, concerne le fait que les acteurs peuvent mal verbaliser des pensées qu'ils ont eues pendant l'exécution de la tâche. Ils peuvent, par exemple, oublier des choses spécifiques qui sont arrivées pendant une tâche. Ericsson et Simon [ERI 1993] soulignent que des informations vitales peuvent s'oublier dans le cas de la rétrospection, en fonction des stimuli offerts aux acteurs pour se souvenir de leurs pensées. Ceci a été confirmé par plusieurs autres études [RUS 1989 ; TEA 2001]. Les biais peuvent aussi survenir lorsque les acteurs décident de cacher des pensées, d'en inventer, ou de les modifier pour des raisons de présentation ou de désirabilité sociale. Ces inconvénients peuvent aussi se rencontrer dans le cas des protocoles de CTA mal montés. Mais ils sont moindres, car la verbalisation est spontanée. Cependant, quand un enregistrement vidéo aide à la rétrospection, les acteurs sont limités par les événements qu'ils ont enregistrés et sont alors considérablement moins libres d'éditer leurs pensées que dans le cas des méthodes rétrospectives non facilitées.

Certains auteurs tendent à décrire les protocoles de CTA et de RTA comme des alternatives égales [HOC 1983 ; BOW 1990 ; NIE 1994]. Mais très peu de preuves empiriques peuvent soutenir ce point de vue. Plusieurs études sont venues par la suite avec des conclusions contraires, en notant des différences notables entre ces deux types de protocoles [BRA 2000 ; KUU 2000 ; TAY 2000]. Cependant, on peut noter que dans les protocoles rétrospectifs faits par ces derniers, il n'y avait pas de stimuli tels que les enregistrements vidéo ou les croquis pour se rappeler l'exécution des tâches.

En définitif, les deux protocoles (CTA et RTA) comportent des spécificités. Ils ont des points communs et des différences. Ils ont des avantages et des inconvénients. Les chercheurs devront choisir l'une des deux méthodes en fonction des objectifs visés. Pour ce qui nous concerne, nous les avons utilisées toutes les deux. La méthode du CTA a d'abord été utilisée quand il fallait avoir un reflet fidèle de la pensée du concepteur pendant son travail, afin de définir un modèle de ses activités. La méthode du RTA a ensuite été utilisée, pour montrer la capacité des modèles CAO à restituer les intentions qui ont été à l'origine de leur création. Ceci a été fait par leur capacité à aider le concepteur à se souvenir des pensées qu'il avait eues lors de son travail.

Nos deux protocoles (CTA et RTA) dans nos expériences sont présentés dans le chapitre 3. Une méthode générique identique a été adoptée pour les analyser. Nous allons décrire cette méthode.

2.3 Méthode d'analyse

En accord avec Dorst et Dijkhuis [DOR 1995] et Suwa *et al.* [SUW 1998], les méthodes d'analyse de protocole sont divisées en deux catégories : l'approche orientée processus et l'approche orientée contenu. La première est centrée sur la description des processus de conception en termes de taxonomie générale de résolution du problème, c'est-à-dire états du problème, plans, buts, stratégies etc. La seconde vise à indiquer le contenu de ce que les concepteurs voient, font, pensent et recherchent pendant la conception.

Les données d'un protocole sont très riches, mais non structurées. Pour obtenir une compréhension détaillée du processus de conception, il est nécessaire de projeter une structure sur les données avant l'analyse. À cet effet, la méthode du *protocol analysis* propose la segmentation du corpus (transcription de la verbalisation), le développement de catégories de codage et le codage de chaque segment. Le développement de catégories de codage et l'interprétation des segments doivent toujours se faire dans un cadre théorique. Les étapes de la transcription et de la segmentation sont considérées dans [ERI 1993] comme des étapes de pré-traitement. Une partie de l'information verbalisée peut alors être éliminée lorsqu'elle s'avère non pertinente pour l'analyse.

2.3.1 Méthodes de segmentation

La segmentation est le processus qui consiste à diviser le protocole en petites unités de telle sorte que chaque segment constitue un élément porteur de sens, reflet du processus général, facile à traiter et à analyser. Ces unités peuvent être des mots individuels, des séquences de mots séparés par des pauses, des phrases, des paragraphes ou même des protocoles complets.

L'un des objectifs de la segmentation est d'identifier objectivement les transitions dans le protocole.

Chaque segment doit être traité comme une donnée indépendante, et son codage est fait sur la base de l'information qu'il contient, indépendamment des segments environnants.

Il existe plusieurs tentatives de définition des méthodes de segmentation. L'une d'elle consiste à diviser le protocole de telle sorte que chaque segment constitue une instance d'un processus général. Le protocole est divisé en événements basés sur la verbalisation [ERI 1993]. Des pauses, des intonations, des phrases ou des expressions complètes peuvent alors marquer la fin d'un segment et le début d'un autre.

Dans une autre méthode, Goldschmidt [GOL 1991] propose une démarche où le corpus de la retranscription, issue du processus de conception, est divisé en mouvements et en arguments. Les mouvements sont des divisions d'un ensemble d'activités de conception en

plus petites unités de raisonnement de conception, une proposition logique concernant une entité qui est conçue. Les arguments sont les plus petits rapports sensibles au sujet de la conception ou de ses aspects liés à un mouvement particulier de conception. Généralement, un mouvement se compose d'un ou plusieurs arguments.

Van Someren *et al.* [VAN 1994] décrivent un processus d'agrégation des segments dans des épisodes. De la même manière Gero *et al.* [GER 1998] proposent de diviser les protocoles selon les intentions du concepteur. L'intention du concepteur est interprétée pour chaque segment. Un changement d'intention entraîne la fin d'un segment et marque le début d'un nouveau segment. Un segment dans cette terminologie correspond étroitement à un épisode dans la terminologie de [VAN 1994].

En plus d'identifier le découpage du protocole par intentions, Suwa *et al.* [SUW 1998] proposent un autre découpage en considérant aussi les types d'actions. Ces types d'actions peuvent caractériser tout un bloc de corpus contenant plusieurs intentions se résumant en la génération d'idées, analyses, d'évaluations etc.

La méthode de segmentation proposée par Gero *et al.* [GER 1998] est semblable à la méthode des arguments de Goldschmidt [GOL 1991], tandis que la méthode de segmentation proposée par Suwa *et al.* [SUW 1998] est semblable à la méthode des mouvements de Goldschmidt. Dans cette dernière approche, un segment simple se compose parfois d'une phrase, et parfois de plusieurs.

Dans [GER 1998], un code correspond à un segment, ainsi la longueur des segments est liée à une sous-catégorie. En revanche, dans [SUW 1998], il y a parfois plus d'un code dans un segment, ainsi les sous-catégories ne sont pas affectées aux segments mais aux intentions des concepteurs. Ceci est d'autant plus vrai que les bases des segmentations sont différentes dans les deux méthodes. La méthode proposée par [GER 1998] est principalement basée sur les transcriptions, alors que les codes proposés par [SUW 1998] sont essentiellement basés sur les actions du concepteur.

Dans nos études, nous avons employé la combinaison de ces deux dernières méthodes, parce que nous avons choisi de nous intéresser à la transcription de la verbalisation et les actions du concepteur. La verbalisation est alors segmentée en utilisant la méthode proposée par [GER 1998] tandis que la vidéo est segmentée en se rapprochant de la méthode de [SUW 1998]. La vidéo a été segmentée à deux niveaux. Le premier niveau concerne le domaine de travail et le second le découpage du protocole selon les pièces modélisées dans le système CAO. Les détails concernant ces segmentations seront donnés dans nos analyses aux chapitres 4 et 5.

2.3.2 Méthodes de codage

Le codage est le processus qui consiste à catégoriser les segments en fonction des informations qu'ils contiennent. Habituellement, le protocole doit d'abord être segmenté puis codé. Mais des chercheurs [KIL 1968 ; ERI 1993] ont estimé qu'il existait des situations où il était préférable de segmenter et de coder simultanément.

Les catégories de codage doivent être au préalable définies de façon claire et explicite. Elles doivent provenir d'abord de la théorie et du modèle développé en fonction du but de la recherche. Son affinement doit ensuite être fait en fonction du contenu du protocole même.

Une base théorique a été bien définie dans [ERI 1993]. D'après cette base, le protocole verbal et les tâches exécutées pendant l'expérience doivent être analysés avant le processus de codage pour extraire le vocabulaire des objets et des relations nécessaires, afin de définir l'espace et les opérateurs du problème. Le nombre de contextes qui doit être considéré est fonction du protocole et de la consistance du codage.

Nous insistons sur le fait que les catégories de codage développées sont d'abord fonction du but qu'on veut atteindre. Ainsi, une revue de la bibliographie fait ressortir plusieurs types de codage différents et variés. Nous en citons quelques uns. Le premier concerne des codes développés et utilisés dans notre équipe de recherche. Ils sont connus sous le nom d'actes de conception. Les suivants concernent les deux approches desquelles nous nous sommes inspirés pour le développement de nos propres codes. Il s'agit de l'approche orientée processus et de l'approche orientée contenu déjà signalées.

2.3.2.1 Actes de conception

Une des méthodes de codage a été développée au sein de notre équipe de recherche [GRA 2001 ; CHO 2004]. Elle repose sur la typologie des actes de conception, issue de l'étude d'une expérience de conception impliquant plusieurs acteurs. Les analyses s'appuient sur l'étude des échanges verbaux, enregistrés et filmés. Un acte de conception est défini comme une interaction d'un concepteur dans (ou vers) un groupe de conception. La typologie proposée classe les échanges entre les concepteurs en proposition et en demande. L'ensemble des codes utilisés est présenté dans le tableau 2.1.

Code	Action	Type
P1	Production (P) (proposition, affirmation, négation)	Information
P2		Solution
P3 [+/-]		Évaluation
P4		Organisation
P5 [+/-]		Accord/Désaccord
P6		Décision
D1	Demande (D)	Information
D2		Solution
D3		Évaluation
D4		Organisation
D5		Accord
D6		Décision

Tableau 2.1 – Actes de conception [GRA 2001 ; CHO 2004]

2.3.2.2 Approche orientée processus

À la suite des travaux commencés dans [PUR 1994], Gero *et al.* [GER 1998] veulent comprendre les aspects de la conception orientés processus et distinguent deux types de catégories de codage : le domaine du problème et les stratégies de conception.

2.3.2.2.1 Domaine du problème

La navigation du concepteur à travers le domaine du problème peut être représentée dans deux dimensions présentées dans le tableau 2.2.

Dimension	Code	Désignation	Explication
Niveau d'abstraction	0	Système	Le concepteur considère le système dans son entier
	1	Interactions	Le concepteur considère les interactions entre les sous-systèmes
	2	Sous-systèmes	Le concepteur considère les détails du sous-système
	3	Détails	Le concepteur considère les détails d'un sous-système
	R	Exigences	Le concepteur modifie ou reconsidère les aspects initiaux d'une exigence
Fonction Comportement Structure	F	Fonction	Le concepteur travaille sur les aspects fonction du domaine du problème
	B	Comportement	Le concepteur travaille sur les aspects comportement du domaine du problème
	S	Structure	Le concepteur travaille sur les aspects structure du domaine du problème

Tableau 2.2 – Domaine du problème selon [GER 1998]

Par exemple, un segment codé par 3S veut dire que le segment concerne les aspects de la structure détaillée d'un sous-système ; 0F veut dire que le concepteur travaille sur les aspects fonction du système général.

La première dimension divise le domaine de problème en un certain nombre de niveaux d'abstraction. Cette dimension vient de la manière avec laquelle le concepteur approche le problème. Certains concepteurs peuvent subdiviser au préalable un problème avant de le résoudre. D'autres peuvent le faire sans identifier consciemment différents sous-problèmes. Dans le premier cas, l'identification des niveaux d'abstraction est plus facile. Dans le second, ces niveaux existent toujours, mais sont plus difficiles à identifier.

La seconde dimension divise le domaine du problème en fonction, comportement et structure (FBS). Le code F (fonction) est lié au but d'un artefact. Le code B (comportement) est lié aux actions ou aux processus d'un objet ou d'un artefact. Le code S (structure) se réfère à la manipulation des objets ou de leurs relations pour produire une solution physique.

Le raisonnement avec la fonction, le comportement et la structure peut être différenciés dans n'importe quel endroit du processus de conception indépendamment du problème résolu à ce moment.

2.3.2.2.2 Stratégies de conception

Pour ce qui est des stratégies de conception, elles sont divisées en deux parties : les micro-stratégies et les macro-stratégies. Les micro-stratégies décrivent le processus et se relient principalement à l'état considéré. Les macro-stratégies peuvent être identifiées en regardant au-delà de l'état considéré et en évaluant le comportement du concepteur dans le contexte de la solution de conception dans sa globalité. La dimension macro-stratégique vient ajouter de la richesse à la représentation.

Les catégories utilisées pour les micro-stratégies émergent des protocoles de conception. Ces catégories sont classifiées en quatre groupes : analyse du problème, analyse d'une solution, proposition d'une solution et stratégies explicites. L'ensemble est présenté dans le tableau 2.3 dans les propres termes de [GER 1998], dans le but de ne pas en altérer le contenu par une traduction.

Code	Désignation	Exemple
	Analysing Problem	
Ap	Analysing the Problem	"What is the system going to need to do..."
Cp	Consulting Information about the Problem	"The brief says it has to be light and..."
Ep	Evaluating the Problem	"That's an important requirement..."
Pp	Postponing Analysis of the Problem	"I can find that out later"
	Proposing Solution	
Ps	Proposing a Solution	"The way to solve that is..."
Cl	Clarifying a Solution	"I'll do that a bit neater..."
Re	Retracting a Previous Solution	"That approach is no good what if I..."
Dd	Making a Design Decision	"OK. We'll go for that on e..."
Co	Consulting External Information	"What are my options..."
Pp	Postponing a Design Action	"I need to do ... later"
La	Looking Ahead	"These things will be trivial to do."
Lb	Looking Back	"Can I improve this solution?"
	Analysing Solution	
An	Analysing a Proposed Solution	"That will work like this..."
Ju	Justifying a Proposed Solution	"This is the way to go because..."
Ca	Calculating on a Proposed Solution	"As above but using Calculator."
Pa	Postponing Analysis of a Proposed Solution	"I'll need to do work that out later"
Ev -	Evaluating a Proposed Solution	"This is faster, cheaper etc."
	Explicit Strategies	
Ka	Referring to Application Knowledge	"In this environment it will need to be..."
Kd	Referring to Domain Knowledge	"I know that these components are..."
Ds	Referring to Design Strategy	"I'm doing this the hard way..."
X	Experiment is making a comment	

Tableau 2.3 – *Micro stratégies de [GER 1998]*

Les macro-stratégies émergent du protocole comme les micro-stratégies, mais sont beaucoup plus liées aux modèles de conception. Au contraire des micros-stratégies, elles peuvent couvrir un nombre important de segments. Cinq catégories distinctes sont identifiées et présentées dans le tableau 2.4.

Code	Désignation	Explication
Td	Top down	Lorsque le concepteur adopte une démarche descendante
Bu	Bottom up	Lorsque le concepteur adopte une démarche ascendante
De	Decomposing the problem	Lorsque le concepteur décompose le problème
Bt	Backtracking	Lorsque le concepteur effectue un retour en arrière
Op	Opportunistic	Lorsqu'un élément externe influence un changement de stratégie

Tableau 2.4 – *Macro stratégie de [GER 1998]*

2.3.2.3 Approche orientée contenu

Les catégories d'informations, développées par Suwa M. *et al.* [SUWA 1998], ont été établies pour comprendre les aspects de la conception orientés contenu. Ils ont employé des notions proposées par Larkin *et al.* [LAR 1987] et défini des sous-classes pour analyser ce que le concepteur a produit, vu et pensé. Ils codent les actions cognitives des concepteurs suivant quatre catégories présentées dans le tableau 2.5. Ces codes ont été utilisés par la suite par [KAV 2001] et [KAV 2002] dans leurs études sur l'imagerie mentale et sur des actions cognitives concurrentes, tant pour un concepteur novice que pour un expert.

Catégorie	Nom	Description	Exemple
Physique	D-action	Faire des descriptions	Lignes, cercles, arrondis, mots
	L-action	Regarder une description précédente	
	M-action	D'autres actions physiques	Enlever le stylo, enlever des éléments, gestes
Perceptuel	P-action	Faire attention aux entités visuelles des éléments	formes, tailles, textures
		Faire attention aux relations spatiales entre les éléments	Proximité, alignement, intersection
		Organiser ou comparer les éléments	Groupement, similarité, contraste
Fonctionnel	F-action	Explorer les issues des interactions entre les artefacts et les gens/nature	Fonctions, circulation des gens, vues, conditions d'éclairage
		Considérer les réactions psychologiques	Fascination, motivation, gaieté
Conceptuel	E-action	Faire des évaluations préférentielles et esthétiques	Aimer-détester, bon-mauvais, beau-laid
	G-action	Installation des buts	
	K-action	Rechercher la connaissance	

Tableau 2.5 – *Catégorie d'actions selon [SUW 1998]*

Les actions physiques correspondent au niveau sensoriel et les actions fonctionnelles et conceptuelles au niveau sémantique.

2.3.2.3.1 Catégorie physique

La catégorie physique se rapporte aux actions qui ont une pertinence directe avec des descriptions physiques sur papier. Il y a trois types d'actions physiques :

- **D-action**, faisant référence aux descriptions sur papier, tels que les diagrammes, les figures, les symboles, les annotations, les notes, et les phrases ;
- **M-action**, faisant référence aux mouvements d'un crayon ou des mains qui ne fournissent pas de descriptions physiques sur papier ;
- **L-action**, faisant référence aux regards portés sur des descriptions existantes (observation).

2.3.2.3.2 Catégorie perceptuelle

La catégorie perceptuelle se rapporte à des actions de présence des entités visio-spatiales des éléments représentés sur les dessins. L'action associée est appelée P-action. Cette catégorie se compose de trois sous-classes :

- la première est constituée des entités visuelles des éléments, telles que leurs formes, tailles et textures ;
- la deuxième est constituée des relations spatiales entre des éléments telles que la proximité, l'éloignement, l'alignement, l'intersection, et ainsi de suite ;
- la troisième est constituée des organisations et des comparaisons entre différents éléments, tels que le groupement d'éléments, la similitude ou uniformité, la différence ou le contraste des entités visuelles.

Les codages obtenus dans cette catégorie dépendent des actions physiques. Ainsi, les trois cas suivants sont observés : (1) une nouvelle description est codée par D-action, (2) son attention à la description existante est codée par L-action, et (3) son attention à la relation spatiale, proximité, est codée par P-action. Les dépendances entre les P-actions et les D-actions et entre les P-actions et les L-actions sont codées en même temps.

2.3.2.3.3 Catégorie fonctionnelle

La catégorie fonctionnelle se réfère aux actions de concevoir des informations non visuelles que les éléments représentés ou à représenter et leurs entités visio-spatiales sont capables de porter. Les actions ici sont nommées F-actions. Cette catégorie se compose de deux sous-classes :

- La première concerne les interactions entre les artefacts conçus et les futurs utilisateurs. Cette première sous-classe correspond à ce qu'on appelle usuellement « fonctions » dans un sens étroit, c.-à-d. en termes de la façon dont les gens utiliseront ou agiront sur/ou avec les artefacts conçus.

- La seconde vient en complément de la première. Les informations non visuelles auxquelles les concepteurs associent les entités visio-spatiales des éléments ne sont pas limitées à son utilisation. Les réponses psychophysiques ou psychologiques aux artefacts conçus sont des critères importants dans l'évaluation des valeurs [PUR 1994]. Par conséquent, il est normal de considérer que celles-ci constituent bien des parties significatives des pensées du concepteur dans le processus de conception. Cette seconde sous-classe des actions fonctionnelles correspond donc aux réactions psychophysiques ou psychologiques que les utilisateurs auront lors des interactions avec les artefacts conçus.

2.3.2.3.4 Catégorie conceptuelle

La catégorie conceptuelle se rapporte aux actions cognitives qui ne sont pas directement suggérées par des représentations physiques ou des entités visio-spatiales. Les actions dans cette catégorie sont de trois types :

- la **E-action** se réfère à l'évaluation préférentielle du concepteur (aimer/ne pas aimer) ou esthétique (beau/laid, bon/mauvais, etc.) des P-actions ou des F-actions.
- la **G-action** se réfère à l'installation des buts, modélisée de la manière suivante : un but peut soit être installé d'une manière ascendante, déclenchée par des P-actions ou des F-actions, soit être pris en compte par l'installation de nouveaux sous-buts d'une manière descendante quand un concepteur divise le problème courant en sous-problèmes pour atteindre un but existant. Une fois qu'un but est installé, il donne alternativement naissance à d'autres actions de manière descendante. Il peut contribuer à la naissance d'autres buts, déclencher la récupération des connaissances, ou motiver des F-actions, des P-actions ou des actions physiques.
- la **K-action** se réfère à la récupération de la connaissance dans la mémoire. La connaissance est recherchée puis employée pour le raisonnement. La récupération de la connaissance et son application implique la production de nouvelles informations ou de nouveaux buts.

2.3.2.3.5 Finalisation du codage

Des indices sont ensuite affectés aux différents codes, pour indiquer si l'intention dans le segment est nouvelle dans le protocole, continue (suite de l'intention dans le segment précédent) ou revisitée (quand l'intention dans le segment est déjà apparue dans le protocole).

Le codage des D-actions et des M-actions est fait à partir de l'enregistrement vidéo, tandis que le codage des L-actions, des actions perceptuelles (P-actions), des actions fonctionnelles (F-actions) et des actions conceptuelles (E-actions, G-action et K-actions) est effectué à partir des teneurs sémantiques des protocoles verbaux (enregistrement audio retranscrit).

2.3.2.4 Approche adoptée

Nous sommes intéressés par le contenu du processus de conception, dans le sens d'étudier la prise en compte des intentions de conception dans les modèles CAO. Nous avons pensé adopter l'approche orientée contenu. Cependant, nous avons remarqué que la catégorisation des codes, leur décomposition et leur définition, telles que nous l'avons rencontré dans la bibliographie [SUW 1998], sont étroitement liées au domaine de l'architecture et doivent au préalable être redéfinies pour une étude dans un autre domaine, qui ici concerne la conception mécanique. Cependant, la démarche que nous avons adoptée s'en inspire.

Les catégories de codage que nous avons développées sont fonction du type d'activité que nous avons vu apparaître dans le protocole. Comme [SUW 1998], le codage a été fait distinctement à deux niveaux : un codage audio et un codage vidéo. Cependant, les types d'activités de conception observées sont différents. Nous avons étudié une séquence de conception faite avec un outil CAO en mécanique, alors que [SUW 1998] étudie des croquis à main levée en conception architecturale. Néanmoins, une bonne partie de nos catégories ont des points communs. Ces points seront signalés lors de la définition de nos catégories de codage pour l'analyse au chapitre 4. Pour le moment, il convient de décrire le processus d'étude de la fiabilité de la méthode de segmentation et de codage.

2.3.3 Méthodes d'étude de la fiabilité des résultats

L'une des tâches centrales dans l'analyse de protocole est de rendre le processus de segmentation et de codage aussi objectif que possible. Les codeurs humains, exposés à une série de déclarations verbales ambiguës, peuvent coder selon leur propre interprétation. Par ailleurs, ils ont aussi beaucoup de peine à éliminer ou à réduire la dépendance entre le codage de segments différents. Ce problème arrive parce que le codeur humain a encore dans la mémoire à court terme le codage et d'autres informations concernant les segments précédents. Cet état de fait peut être pallié par deux moyens [ERI 1993] :

- premièrement, en définissant un segment de telle sorte qu'il contienne toutes les informations nécessaires pour prendre une décision de codage le concernant, à partir des catégories de codage prédéfinies.
- deuxièmement, en codant les segments dans un ordre aléatoire. Pour cela, [ERI 1993] proposent d'informatiser le processus. Ils décrivent un système informatique (MPAS : *Mini Protocol Analysis System*) pour faire de pareils codages. On entre le protocole segmenté dans le système. Ce programme se charge de donner au codeur les segments un à un et dans un ordre aléatoire. Le codeur peut ainsi coder au fur et à mesure chaque segment. Le programme se charge par la suite de remettre chaque segment codé à sa place dans le protocole.

Le codage est souvent évalué par un test de fiabilité. Ceci est obtenu en ayant un accord avec le codage fait par plusieurs personnes indépendamment. Des théories proposent de faire une comparaison de plusieurs processus de segmentation et de codage du même protocole, d'évaluer le pourcentage d'accord parmi tous ces processus et de prendre le résultat comme une mesure globale de la fiabilité. Si le résultat n'est pas satisfaisant, la fiabilité peut être apportée en retrouvant dans le protocole les segments de désaccord et en établissant les raisons du désaccord. Ainsi, si ces raisons sont éliminées, la fiabilité s'améliorera. C'est sur cette base que des méthodes ont été adaptées à l'étude de la fiabilité dans le *protocol analysis*. Nous citerons ici la méthode Delhi [LIN 1975 ; CRO 2005] et la méthode de Delft [GER 1998].

2.3.3.1 Méthode Delphi

La méthode Delphi a pour finalité de mettre en évidence des convergences d'opinion et de dégager un consensus sur des sujets précis, par l'interrogation d'experts, à l'aide de questionnaires successifs [CRO 2005].

La méthode consiste en un débat maîtrisé ouvrant sur un consensus. Les experts sollicités formulent indépendamment les uns des autres leurs opinions. La complémentarité est obtenue par rétrocession. L'information, une fois recueillie et traitée par l'organisateur, est retournée aux experts, lesquels sont invités à réviser leurs estimations ou leurs remarques au regard de l'ensemble des évaluations du groupe d'experts. Cette rétrocession, sujette à plusieurs allers-retours, vise à expliciter les argumentaires extrémistes et à forcer ainsi l'ouverture d'un compromis. Les séquences du déroulement de la méthode sont décrites par la figure 2.5.

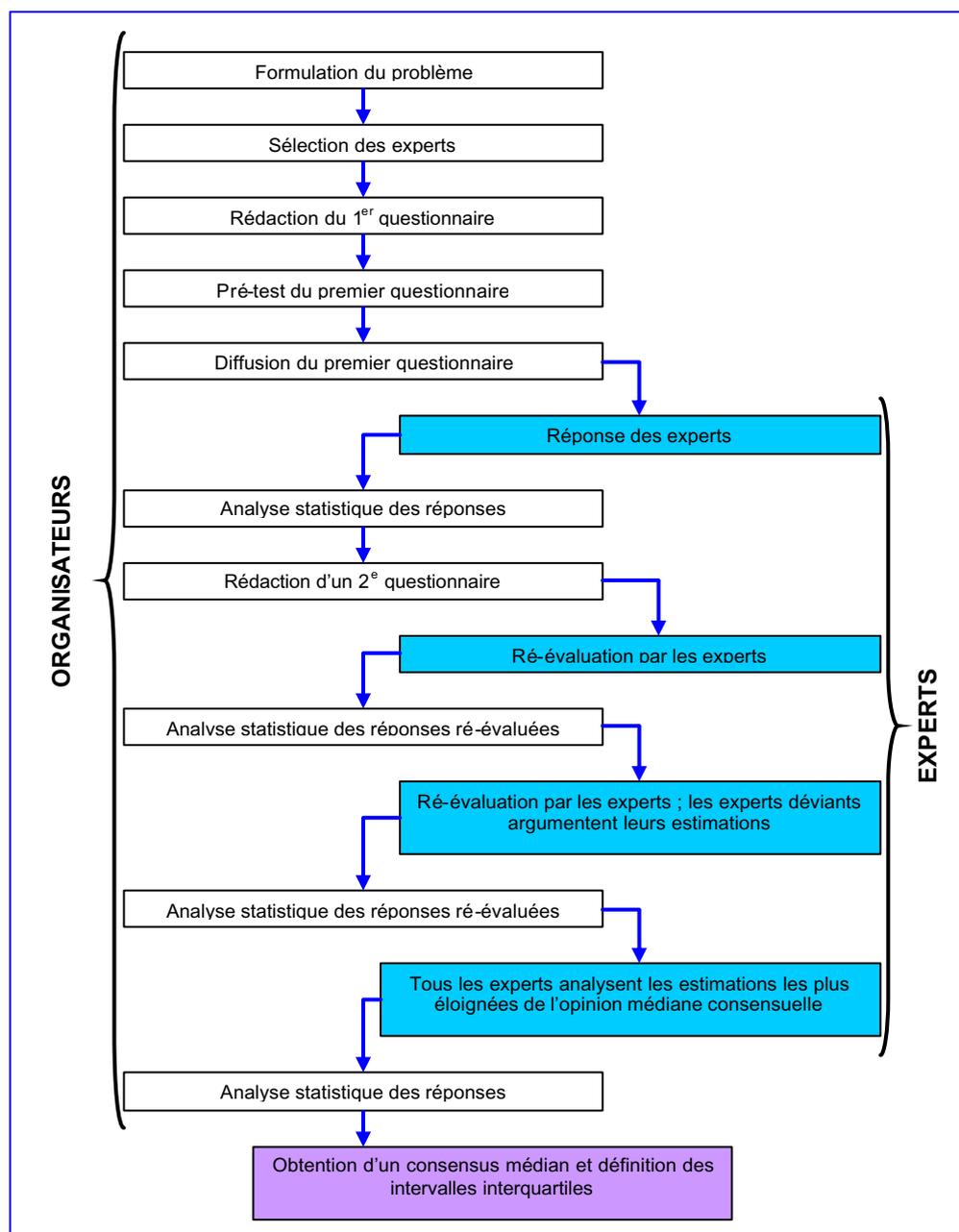


Figure 2.5 – Séquence de déroulement de la méthode Delphi selon [CRO 2005]

La méthode comporte quatre étapes essentielles.

2.3.3.1.1 Étape 1 : formulation du problème

La formulation du problème consiste à définir avec rigueur et précision l'objet sur lequel portera la méthode Delphi. L'objet comprend la problématique et ses environnements à solutionner par les experts. Il est important de bien délimiter le périmètre du thème abordé. Une problématique mal bornée serait susceptible de ne jamais déboucher sur un consensus en raison de l'existence possible de plusieurs solutions ou d'une évolution permanente de la problématique.

Dans notre cas ici, il s'agit de la segmentation et du codage de nos protocoles. La méthode peut être appliquée indépendamment à la segmentation ou au codage. Elle peut aussi être appliquée aux deux à la fois. Il conviendra de bien expliquer s'il s'agit de segmenter ou de coder le protocole verbal, le protocole vidéo ou les deux à la fois. Dans le cas où les processus de segmentation et de codage seront faits à la fois par les mêmes experts, il sera aussi important de souligner que le protocole sera d'abord segmenté et que le codage de chaque segment se fera ensuite uniquement à partir des informations qu'il contient indépendamment des segments environnants.

2.3.3.1.2 Étape 2 : sélection des experts

La sélection des experts conditionne la qualité du résultat. La dénomination « experts » comprend toutes personnes dont les expériences et les connaissances les rendent aptes à effectuer les investigations dont il est question. Ils doivent être informés que d'autres experts font le même travail, mais que l'anonymat des personnes est requis et que les résultats seront rendus anonymes lors du traitement et de la restitution à l'ensemble du groupe. Seul l'organisateur dispose de la liste nominative des experts participants. L'anonymat garantit une pleine expression des opinions, car un expert peut être réticent à écrire officiellement ses opinions par crainte d'être dénigré.

Dans notre cas, Les experts pourront être des chercheurs en conception mécanique qui savent réaliser efficacement les opérations de segmentation et de codage des protocoles. Ils doivent être suffisamment motivés (surtout vis-à-vis de la méthode ou des résultats) pour fournir un travail de bonne qualité. Le nombre d'experts n'est pas imposé à l'avance. Il dépendra de l'objectif à atteindre et des ressources humaines disponibles.

2.3.3.1.3 Étape 3 : rédaction du problème (premier et deuxième questionnaires, pré-test)

Cette phase consiste à définir la méthode de segmentation ou à développer les catégories de codage et à les expliquer. Elles sont mises à la disposition des experts en même temps que le corpus à segmenter. Si un expert a des questions à ces sujets, des réponses précises et explicites lui seront données pour ne laisser aucune ambiguïté. À partir des premières réponses des experts, un deuxième questionnaire peut être défini si les résultats sont très divergents et que l'organisateur a l'impression que dans le premier, l'explication de la méthode de segmentation et de codage n'a pas été suffisante.

2.3.3.1.4 Étape 4 : tours de consultations, recueil et traitement des résultats

Au premier tour de segmentation ou de codage, les experts sont invités à exprimer s'ils ont rencontré des problèmes lors de certaines segmentations et/ou de certains codages et en indiquant les segments concernés et les raisons de leurs embarras. Ceci pourra jouer un rôle de filtre pour l'organisateur dans la définition du deuxième questionnaire. À la fin du premier

tour, l'organisateur compile l'ensemble des résultats reçus, les rend anonyme et les retourne au groupe d'experts interrogés. Chaque expert prend individuellement connaissance des nouveaux éléments fournis par les autres membres du groupe et bénéficie ainsi de la complémentarité des points de vue pour réviser ses jugements. Outre le positionnement de sa réponse au regard des autres, l'expert prend connaissance de nouveaux aspects de la thématique et enrichit sa réponse par complément ou réaction vis-à-vis des écrits de ses confrères. La compilation conduit à une première opinion consensuelle médiane communiquée aux experts consultés (deuxième tour). Après le deuxième tour, il est demandé aux experts présentant les estimations les plus éloignées de la médiane calculée pour le groupe de justifier leurs positions. L'organisateur rédige une nouvelle synthèse qu'il soumet à nouveau au groupe (troisième tour). Lors du troisième tour, l'organisateur renvoie la synthèse des réponses aux experts, lesquels sont chargés de commenter les estimations les plus éloignées du groupe et de procurer leurs estimations définitives (quatrième tour). Erffmeyer *et al.* [ERF 1986] constatent une stabilité des résultats obtenus à partir de quatre tours effectués et proposent de s'arrêter là. À l'issue du quatrième tour donc, une dernière synthèse est effectuée et un consensus médian doit être dégagé. Ce dernier sera complété d'un indice de déviation représenté par les intervalles interquartiles, dans le cadre des réponses quantifiées. Les réponses trop éloignées des positions médianes seront alors supprimées.

2.3.3.2 Méthode de Delft

La méthode de Delft [GER 1998], s'inspire de la méthode Delphi. Les quatre étapes sont suivies, mais l'opération se passe avec un seul expert (segmenteur/codeur).

La séquence d'opérations est récapitulée par la figure 2.6.

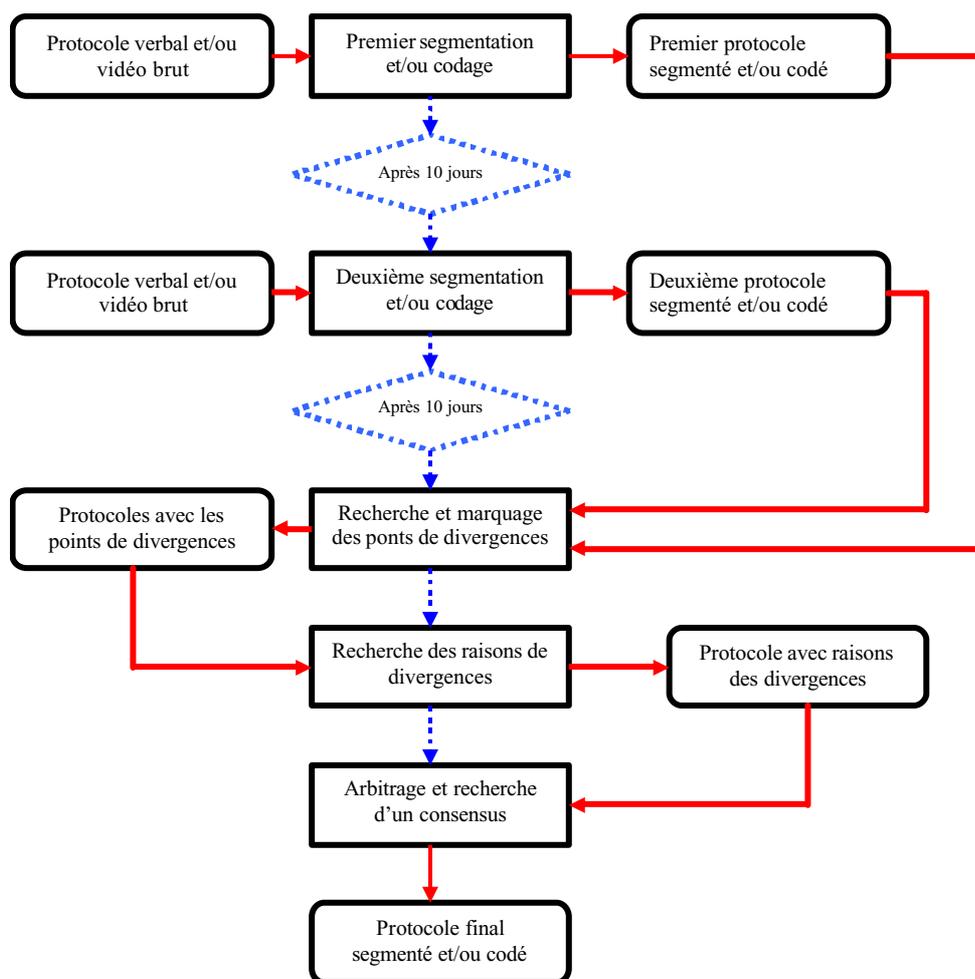


Figure 2.6 – *Séquence de la méthode d'étude de fiabilité de Delft*

Chaque protocole est segmenté/codé deux fois par la même personne (expert en segmentation/codage) à dix jours d'intervalle. Cette pause permet à l'expert d'être déconnecté du premier codage avant d'aborder le second. Ceci pourra améliorer l'objectivité des résultats et augmenter l'indépendance des deux résultats.

Après dix jours de plus encore, à partir de la fin de la deuxième segmentation/codage, les deux protocoles segmentés et codés sont comparés. Les divergences et leurs raisons sont notées. Un arbitrage permet de tomber sur un consensus pour produire un protocole unique segmenté et codé. Pendant cette étape, les différences entre les premier et deuxième protocoles sont identifiées et sont examinées plus étroitement. La méthode explore ainsi des secteurs dans les protocoles où les ambiguïtés peuvent exister. De ces ambiguïtés, les codes peuvent avoir besoin d'être améliorés. Le jugement est fixé en se reportant au pourcentage d'accords entre la segmentation/codage finale et les deux segmentation/codage faites dans l'intervalle de dix jours.

Pour augmenter la fiabilité de la méthode de Delft, une variante consiste à utiliser deux segmenteurs/codeurs, qui suivront chacun de leur côté le processus décrit sur la figure 2.8.

Les deux segmenteurs/codeurs se retrouvent à la fin pour trouver un consensus final s'il y a des divergences entre leurs deux protocoles finaux.

Selon [ERI 1993] la segmentation et le codage sont extrêmement coûteux en temps, et il est souvent difficile de trouver des experts volontaires pour les dupliquer. Nous avons observé la même difficulté. De plus, comme indiquent les raisons de confidentialité exigée dans la méthode Delphi, il nous est difficile de garder un certain anonymat si les experts sont choisis parmi les collègues de notre équipe de recherche. D'autre part, la méthode Delft semble plus facile à appliquer. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'adopter la méthode Delft pour l'étude de la fiabilité de notre segmentation et de notre codage. Les détails de cette étude sont présentés au chapitre 4 de cette thèse lors de nos analyses.

2.4 Conclusion

Nous avons commencé ce chapitre en situant notre travail dans un schéma traditionnel de recherche et développement. Ainsi, nous sommes appelés à développer une recherche qui pourra contribuer à améliorer les outils CAO actuels, ou à développer de nouveaux outils capables de les suppléer dans la représentation des intentions de conception. Ceci devra s'inscrire dans une démarche. Cette démarche globale de recherche, développée au laboratoire M3M et dans laquelle s'inscrivent nos travaux a été synthétiquement présentée. Ensuite, nous avons présenté la méthode du *protocol analysis* que nous avons choisie pour appliquer la démarche. Un plan d'exécution de la méthode a été proposé, que nous avons présenté en deux temps : la méthode expérimentale et la méthode d'analyse. Dans la méthode expérimentale nous avons été amenés à aborder les critères de choix du problème de conception pour les expérimentations et la présentation des différents types de verbalisation qui se trouvent au cœur de la méthode. Dans la méthode d'analyse, nous avons d'abord présenté les méthodes de segmentation et de codage rencontrées dans la bibliographie. Il apparaît nécessaire de rendre fiables les résultats obtenus de la segmentation et du codage. Nous avons présenté, par la suite, les méthodes d'études de fiabilité des résultats obtenus de la segmentation et du codage. Enfin, notre choix et notre positionnement par rapport à ces différentes méthodes ont été justifiés.

Notre méthode ayant été ainsi présentée, nous allons à présent aborder son application réelle telle que nous l'avons fait pour atteindre nos objectifs. Nous commencerons par présenter les expériences de conception que nous avons montées et réalisées pour cette étude dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Expériences de conception

3.1 Introduction

D'une façon générale, une expérience a pour but d'éprouver, d'apprendre ou de découvrir. Elle peut permettre de déterminer des propriétés de l'objet de l'expérience, de vérifier des hypothèses ou d'acquérir des connaissances. C'est une technique qui a été depuis toujours utilisée dans des domaines scientifiques variés. Cependant, dans le domaine de la conception, son utilisation n'a pris de l'essor que pendant ces dernières années et reste encore peu utilisée. Nos études se situent dans ce domaine et l'objet de l'expérience est la conception d'un produit mécanique.

Nous avons fait usage d'un plan qui s'inscrit dans une méthode logique et rigoureuse définie par le schéma d'acquisition des connaissances proposé par Goupy [GOU 1997], que nous présentons sur la figure 3.1.

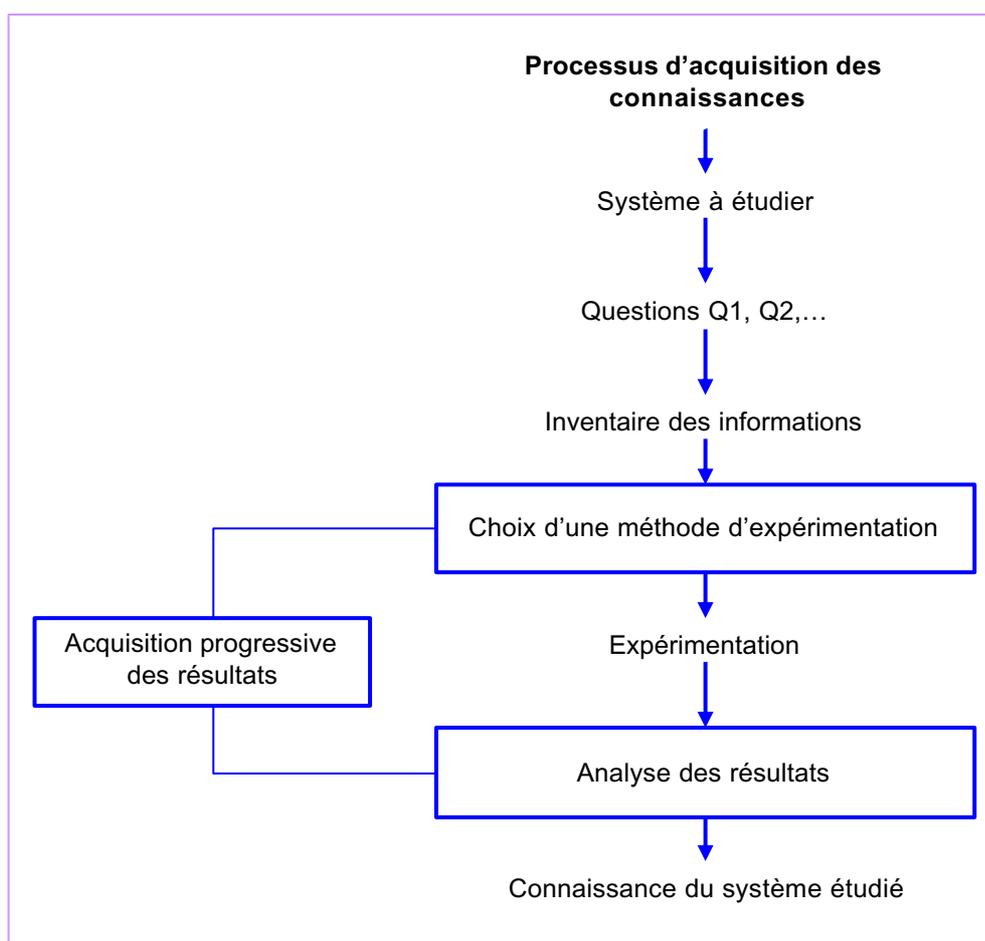


Figure 3.1 – Schéma d'acquisition des connaissances selon [GOU 1997]

La première étape consiste à définir le système que l'on se propose d'étudier. Conformément au but de notre recherche, nous voulons comprendre le processus de conception à l'aide d'outils CAO et mesurer l'efficacité de ces derniers dans la représentation des intentions de conception. Le système que nous avons à étudier est constitué de l'outil CAO, des intentions, du processus et des produits de la conception.

Les expériences que nous avons montées et réalisées visaient à atteindre des objectifs. Ces derniers sont formulés en termes de questions pour lesquelles nous désirions avoir des réponses. Ces questions sont :

Comment peut-on observer et avoir accès aux pensées du concepteur dans un processus de conception à l'aide d'outil CAO ?

Quels sont les moyens d'observation et quels sont les éléments sur lesquels l'attention doit être particulièrement portée pendant l'observation ?

L'outil CAO actuel est-il capable d'effectuer une représentation idéale des intentions de conception ?

Un modèle géométrique du produit obtenu et visualisé sur CAO est-il capable de permettre à un concepteur de restituer toutes les intentions qu'il représente ?

Sinon, comment faire pour y parvenir ?

À partir de l'ensemble des questions posées, il nous est apparu utile, dans un premier temps, de vérifier à partir de la bibliographie si des éléments de réponses n'existaient pas déjà. La synthèse de cette bibliographie présentée dans le premier chapitre montre que peu d'éléments ont été apportés. Il en ressort que du travail reste encore à faire.

Dans l'optique de mieux maîtriser nos expériences, nous avons commencé notre travail par l'analyse préalable d'une expérience antérieurement réalisée dans notre laboratoire et qui s'approchait de celles que nous voulions monter. Cette expérience et les résultats de son étude sont d'abord présentés dans ce chapitre. Ensuite nous aborderons la nouvelle expérience que nous voulons réaliser, suivie du problème de conception ainsi que l'organisation et le déroulement détaillés de ces expériences. Nous terminons le chapitre par la présentation et l'organisation des données obtenues des expériences et qui seront utiles pour nos analyses.

3.2 Validation de la méthode par une expérience préliminaire

3.2.1 Expérience de conception d'un bras oscillant de moto

Il s'agit d'une expérience qui a été réalisée au sein de notre équipe de recherche et qui a déjà fait l'objet d'investigations dans des buts différents du nôtre [BOZ 2003 ; PEN 2003]. L'acteur (concepteur) avait une expérience en conception et CAO, mais peu d'habitudes sur

l'utilisation du logiciel CATIA V5. Il lui avait été demandé de concevoir un bras oscillant de fourche de moto et de verbaliser en même temps ses pensées. Le problème de conception avait été présenté sous forme d'un cahier des charges. Nous en donnons ci-dessous les grandes lignes.

Le schéma cinématique présenté sur la figure 3.2, issu d'une étude plus générale, donne les liaisons du bras oscillant avec les autres éléments de la suspension de la roue avant de la moto.

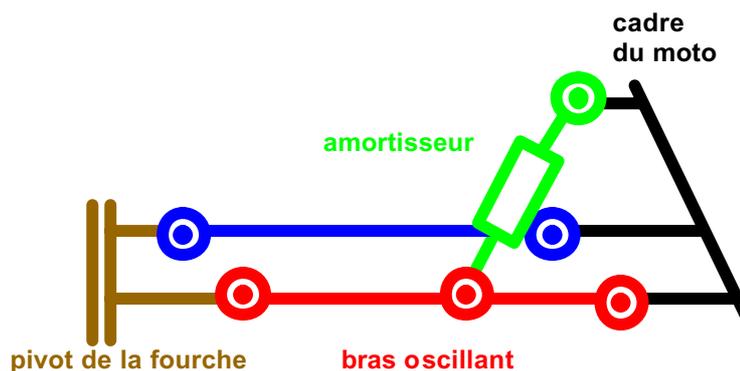


Figure 3.2 – Schéma cinématique du bras oscillant de fourche de moto

Les caractéristiques des trois liaisons pivots sont précisées sur la figure 3.3.

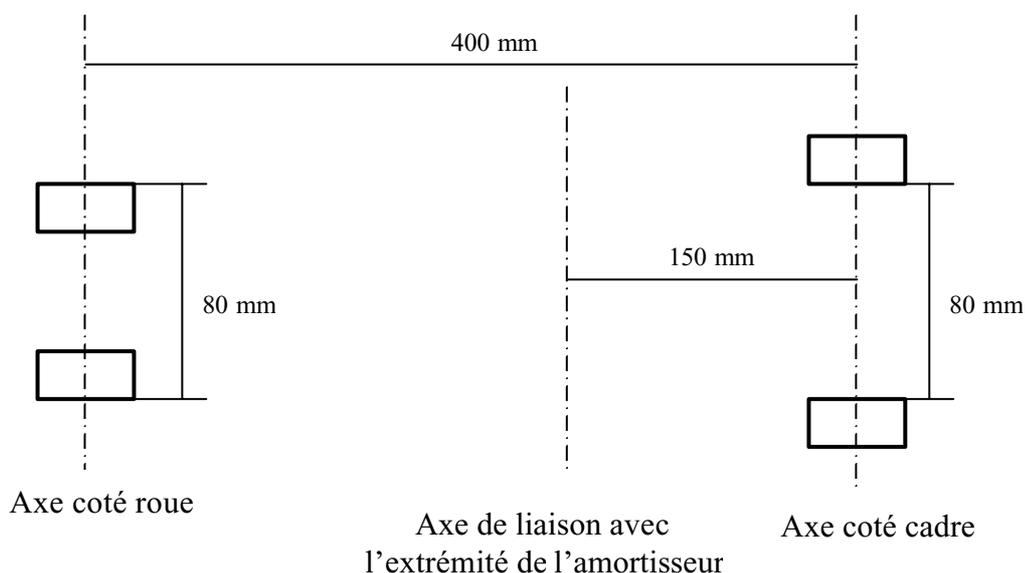


Figure 3.3 – Entre-axes et écartements de roulements

La figure 3.3 présente également la disposition de quatre roulements à aiguilles (2 côté roue et 2 côté cadre) à utiliser dans les pivots extrêmes du bras. Ces quatre roulements à aiguilles sont identiques et ont les caractéristiques suivantes :

- diamètre extérieur : 34 mm,

- diamètre intérieur : 24 mm,
- longueur : 20 mm.

Enfin, la figure 3.4 présente l'extrémité de l'amortisseur qui sera en liaison avec le bras.

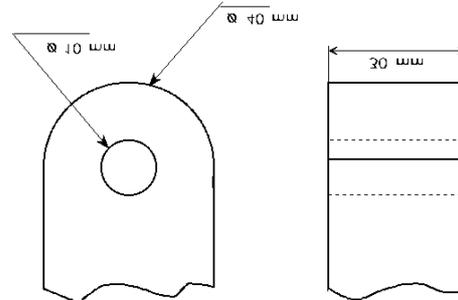


Figure 3.4 – Extrémité de l'amortisseur en liaison avec le bras

La résistance de la pièce finale doit être prévue pour supporter :

- Le poids de la moto (= 250 kg) + passagers et chargement (= 200 kg)
- Le choc de la roue avant avec un trottoir de 20 cm à 60 km/h, avec une accélération maximum de 3g ($g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$).

Seule la liaison avec le cadre de la moto est définie, la pièce réalisant cette fonction est à concevoir et toutes les libertés sont laissées au concepteur.

Ce bras sera réalisé à partir d'un brut de fonderie en AU4G. Il faut donc concevoir le bras terminé et le brut de fonderie.

Le travail de conception a été fait à main levée sur un croquis (figure 3.5), puis sur une station de travail disposant du logiciel CATIA V5. Seule la seconde partie a été enregistrée en audio/vidéo.

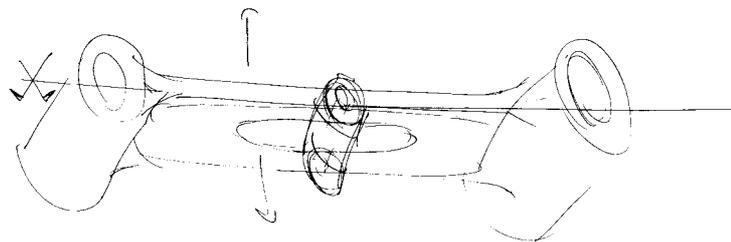


Figure 3.5 – Esquisse du bras oscillant de moto

La durée de la session a volontairement été limitée à une heure. L'expérience a été suivie par deux observateurs, sans aucune intervention de leur part pendant toute sa durée. Le matériel d'enregistrement audio/vidéo était placé de sorte à enregistrer l'écran et la verbalisation du concepteur tout au long de la séance expérimentale. Les paroles enregistrées

ont ensuite été retranscrites. Le modèle CAO produit en fin d'expérience est donné sur la figure 3.6.

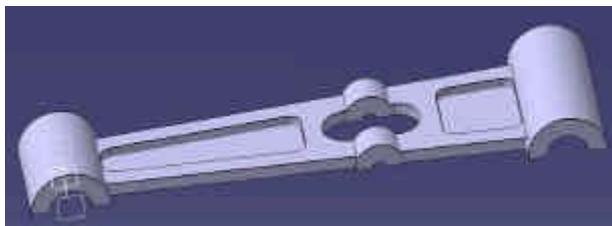


Figure 3.6 – *Modèle CAO du bras produit en fin de l'expérience*

Il convient de noter que ce modèle CAO n'est pas une solution finie dans la mesure où l'expérience a été arrêtée au bout d'une heure au moment où le concepteur avait fait une coupe de sa pièce pour effectuer les dépouilles et les congés de raccordement et devait probablement la compléter ensuite par symétrie.

3.2.2 Qualité de la verbalisation dans ce protocole et validité

Avec une seule instruction ambiguë reçue par le concepteur, nous avons pensé que la verbalisation concurrente produite pourrait contenir les deux types de ce genre de verbalisation et nous avons entrepris de les quantifier. En utilisant la méthode de segmentation intentionnelle, nous avons découpé le protocole et catégorisé en verbalisation sociale (codé par VS) et en verbalisation de la pensée à haute voix (codé par CTA).

VS code tous les segments dans lesquels le concepteur a essayé d'expliquer ou de justifier ses intentions, tandis que CTA code ceux dans lesquels le concepteur a verbalisé ses pensées sans explications ni justifications, comme s'il s'adressait à lui-même. Cette catégorisation a pour but de vérifier la qualité de la verbalisation pour mieux fixer les conditions et la procédure adéquate pour nos futures expériences, notamment la partie concernant le CTA qui n'est pas toujours facile à obtenir. Un exemple de ces segments codés est donné dans le tableau 3.1.

Temps	Segments	Codes
01:51	Donc la première chose que je pense réaliser c'est de commencer par les parties où vont venir se loger les paliers à aiguilles. Les parties fonctionnelles.	CTA
06 :54	Ce premier diamètre je vais le mettre à 10 mm, je vais rajouter à peu près, pour l'instant 15 mm de part les efforts.	CTA
10 :02	C'est à dire ici ça va être plein de là jusque là en laissant le passage pour l'amortisseur et après se séparer en deux bras que je viendrai peu être consolider par la suite.	VS
10 :20	Là j'ai pas d'idée précise sur, au niveau de la résistance mécanique dans cette partie là du bras.	CTA
12 :41	Je suis en train de réfléchir un peu aux usinages qui vont venir par la suite en bout d'arbre. Sur les bouts d'arbres qu'on va sans doutes usiner pour, pour les appuis de l'arbre contre les différentes pièces qui se trouvent autour.	CTA
22 :37	Pour créer un dégagement et pour créer une surface d'épaulement lorsque je vais emmancher à force mes paliers à aiguilles.	VS
27 :42	Alors je sais plus comment on crée un trou oblong. Je suppose qu'il faut que je sélectionne ici là et que j'appuie là. Voilà.	CTA
27 :50	Pour ce trou oblong là, je l'ai fait pour permettre l'introduction du bout de l'amortisseur dans mon bras	VS

Tableau 3.1 – Exemple de segments codés par VS et CTA

Dans la première colonne du tableau 3.1, nous avons reporté le temps. La deuxième colonne contient le contenu de la transcription de la verbalisation et la dernière colonne contient les codes affectés à chaque segment.

Après analyse, les résultats sont conformes à nos prévisions. La verbalisation utilisée dans le processus est concurrente et contient à la fois du VS et du CTA. Des 197 segments obtenus, 129 (65%) correspondent au code CTA et 68 (35%) au code VS. Ces proportions sont plus explicites sur la figure 3.7.

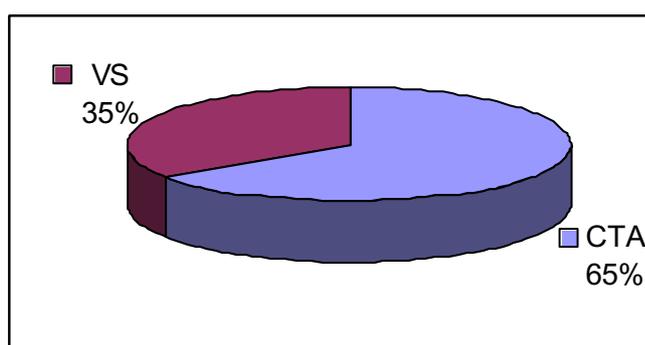


Figure 3.7 – Proportions de la verbalisation sociale (VS) et de la pensée concurrente à haute voix (CTA) dans le protocole

La majorité de CTA s'explique par le fait qu'il avait été demandé au concepteur de verbaliser ses pensées à haute voix tout au long du processus. La présence d'un grand nombre

de VS s'expliquerait par l'absence d'instructions complémentaires pour amener le concepteur à ne pas être tenté de s'expliquer et de se justifier.

Plusieurs auteurs [ERI 1993; CRO 1996; MAA 2003] préconisent que les expérimentateurs ne soient pas visibles par les acteurs pendant le protocole, pour minimiser l'introduction de VS dans les protocoles du CTA. Ils peuvent par exemple se mettre derrière lui ou le laisser seul avec le matériel suffisant pour enregistrer tout ce qui se passe pendant le protocole. Ensuite, les instructions du CTA doivent être aussi explicites que possible pour empêcher les acteurs d'être tentés d'expliquer ou de décrire leur verbalisation. De plus, il doit être demandé explicitement au sujet de se concentrer exclusivement sur l'exécution de la tâche pendant le protocole, car ce n'est que dans ces conditions que la séquence des pensées peut être semblable à celle produite en exécutant la même tâche dans le silence. Enfin, on peut donner au préalable aux sujets des exercices d'entraînement dans lesquels il est facile de verbaliser simultanément pour leur permettre de se familiariser avec la procédure de la méthode du CTA avant le début de l'expérience.

L'existence des deux types de verbalisation concurrente dans le protocole en proportion non négligeable indique que ces précautions n'ont pas été suffisamment prises. Ainsi, on se rend compte que bien des fois, le concepteur cherche à communiquer. Il recherche alors la cohérence dans sa verbalisation. C'est ce qui explique la présence de la verbalisation sociale. Il serait donc important de rappeler au concepteur de ne pas chercher la cohérence dans sa verbalisation et de dire tout simplement à haute voix ce qu'il pense sans explication, ni justification, comme s'il s'adressait à lui-même. C'est en faisant ainsi qu'il garde des chances de révéler le processus de pensées réel utilisé pour exécuter la tâche. Dans la phase de nos expériences où nous utilisons la méthode du CTA, notre but sera de garantir une correspondance étroite entre le protocole verbal et le processus réel utilisé pour exécuter la tâche. Il sera donc indispensable que le concepteur résiste à toutes les tentations de rechercher la cohérence dans la verbalisation en "forçant" la pensée à haute voix par des rappels d'instructions courtes de la part des expérimentateurs, comme prescrit par [WRI 1991] et [BOR 2000].

De plus, si le concepteur commence sa conception par une esquisse qui lui donne une idée sur la pièce à concevoir, c'est pendant cette période qu'une majeure partie des décisions concernant l'allure finale de la pièce est adoptée. Il serait donc important d'avoir les pensées du concepteur pendant cette période. Or nous avons noté une absence de données audio/vidéo de cette partie. Tout se passe comme si le concepteur avait compris qu'il fallait verbaliser seulement la partie de travail à faire avec l'outil CAO. Ici aussi, il y a un défaut d'instructions précises qui aurait pu permettre au concepteur de verbaliser tout son travail. Nous en avons tenu compte lors du montage de nos expériences.

Par ailleurs, en plus des biais notés dans la verbalisation, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- le produit à concevoir était assez simple (une seule pièce) et ne présentait pas d'assemblage ;
- il était difficile d'asseoir un jugement à partir d'une seule expérience. D'où la nécessité de monter une même expérience plusieurs fois et dans les mêmes conditions avec des concepteurs différents compte tenu des aptitudes différentes des personnes à verbaliser leurs pensées.

Ces premières analyses nous ont permis de préparer une procédure appropriée pour chaque phase de nos expériences. La description plus détaillée de cette procédure fera l'objet des prochains paragraphes de ce chapitre.

3.3 Présentation de nos expériences

Des objectifs que nous avons à atteindre, nous avons au préalable défini les types d'expériences à faire. À savoir, une expérience utilisant le CTA, suivie d'un débriefing et du RTA. Le CTA nous permettra d'observer et de comprendre la conception à l'aide d'outil CAO, dont un modèle d'activités sera présenté dans le quatrième chapitre. Le débriefing aura pour but de présenter les problèmes particuliers rencontrés dans le CTA. Le RTA combiné avec le CTA nous permettra de mesurer la capacité des modèles CAO à prendre en compte les intentions de conception et à les restituer après sa création. Ceci nous a amené à définir un cadre pour attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit que nous présenterons au cinquième chapitre.

L'étude de l'expérience préliminaire faite sur le bras de moto nous a permis de prendre un certain nombre de précautions afin d'améliorer nos expériences. Plus concrètement, des instructions plus précises ont été définies en rapport avec la bibliographie [WRI 1991 ; ERI 1993 ; BOR 2000]. Elles permettront non seulement d'assurer une certaine fidélité de la méthode du CTA, mais aussi une verbalisation de tout le processus de conception, de l'esquisse au modèle CAO final du produit. Par ailleurs, nous avons noté qu'il était nécessaire de répéter plusieurs fois une même expérience avec des acteurs différents pour minimiser des biais qui pourraient se produire du fait de l'aptitude d'un seul concepteur à produire une verbalisation de ses pensées. Nous avons aussi noté qu'il était important que le problème de conception ait une certaine complexité. Il a été défini de sorte que la solution (modèle CAO) présente un assemblage de pièces.

Les expérimentations ont été faites au laboratoire M3M sur des stations disposant du logiciel CATIA V5. Le choix des acteurs (concepteurs) s'est porté sur quatre étudiants en cycle d'ingénieur de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Ces acteurs avaient l'habitude et la maîtrise de l'utilisation du logiciel CATIA V5. En outre, ils avaient des connaissances en conception mécanique. Ils étaient volontaires et motivés. Le

travail expérimental a été volontairement limité (maximum 2 heures) pour faciliter l'analyse. Le sujet de conception a été choisi en conséquence. Les salles expérimentales contenaient du matériel pour faciliter l'enregistrement audio/vidéo de toute l'activité de conception. Ce matériel était suppléé par des feuilles de papier vierge, un stylo à bille, un crayon pour faire des croquis et prendre des notes si nécessaire et une station de travail sur laquelle était installé le logiciel CATIA V5. Une vue du dispositif du montage de l'expérience est présentée sur la figure 3.8.



Figure 3.8 – *Vue du dispositif du montage expérimental*

Un expérimentateur était présent dans la salle pour fournir éventuellement des informations et des données nécessaires pour aider le concepteur s'il le demandait. Il veillait aussi à ce que l'expérience se déroule dans des conditions qui faciliteront l'obtention de données fiables et analysables. Il pouvait par exemple demander au concepteur de parler à haute voix s'il n'était pas suffisamment audible ou rappeler au concepteur de ne pas essayer d'expliquer ce qu'il faisait et de dire juste ce qu'il pense, par des courtes instructions telles que « plus haut », « verbalisez », etc.

Dans la salle, il y avait aussi un technicien chargé de l'enregistrement audio/vidéo. Il était chargé de s'assurer que le matériel fonctionnait parfaitement tout au long de la séance expérimentale et surtout de veiller à ce que toute l'activité de conception soit enregistrée confortablement.

Le matériel d'enregistrement audio/vidéo a été placé de sorte à enregistrer :

- une vue générale de l'espace de travail du concepteur ;
- tous les mouvements et gestes du concepteur ;
- tous les croquis et dessins produits par le concepteur ;
- l'écran de la station de travail ;
- la verbalisation du concepteur ;

- les instructions qui étaient données au concepteur avant, pendant et après la séance.

Au cours de la session expérimentale, l'expérimentateur et le technicien d'enregistrement se sont positionnés de sorte à ne pas être vus par le concepteur.

Les différentes étapes que nous avons suivies du montage de l'expérience aux données brutes obtenues sont décrites dans la suite de ce chapitre. Nous insisterons notamment sur le problème de conception, l'organisation et le déroulement des expériences, les solutions obtenues en fin d'expériences et la présentation des autres données obtenues de l'expérience et utiles pour nos futures analyses.

3.4 Problème de conception

Le choix et le cadre précis du problème de conception sont très importants dans la méthode du *protocol analysis*. Les chercheurs, à cette étape de travail, doivent prendre beaucoup de temps, de soin et d'effort pour produire un sujet de conception qui sera approprié aux buts de leur recherche [DOR 1996]. À ce niveau, nous avons tenu compte d'un certain nombre de paramètres en fonction de nos objectifs. Nous avons choisi un problème de conception qui consistait à concevoir un sous-ensemble simple d'un ensemble plus complexe déjà bien défini. Quelques dessins d'ensemble et de définition ont été fournis ainsi que le modèle CAO représentant l'ensemble auquel il manque le sous-ensemble à concevoir. Les critères fonctionnels (fonctions et adaptation à l'ensemble environnant) ont été présentés sous forme concise dans un cahier des charges. Le cadre d'intervention du concepteur sur les autres éléments de l'ensemble a été très limité. Il avait à prendre les éléments de relation définis tels quels et concevoir le sous-ensemble pour satisfaire à toutes les exigences. Compte tenu du niveau de connaissance et du profil des concepteurs (étudiants en cycle d'ingénieur GMC (Génie Mécanique et Conception) et GSP (Génie des Systèmes de Production), les contraintes industrielles ont été limitées. Les éléments liés aux calculs de dimensionnement ont été allégés. Cependant, le sous-ensemble à concevoir avait un degré de complexité qui devait permettre lors de l'analyse de faire ressortir tous les éléments désirés.

3.4.1 Énoncé

Le sujet a été inspiré d'un projet de fin d'étude d'ingénieur développé dans [MOV 1996]. Les images des figures 3.9, 3.10 et 3.12 en sont tirées. Ce sujet a été modifié et adapté à notre convenance. L'énoncé du problème que nous avons ainsi défini est reproduit ci-dessous.

Un constructeur automobile demande à un laboratoire de faire des essais de fatigue en flexion alternée symétrique, d'amplitude un millimètre et de fréquence d'environ trois Hertz,

pour des colonnes de direction. Le laboratoire en question a la responsabilité de concevoir une machine devant servir à cet effet. Le constructeur met à la disposition du laboratoire un schéma présentant la colonne de direction montée au système (figure 3.9). Ce schéma montre tout simplement comment la colonne sera fixée au système et dans quelle direction les essais de flexion seront faits. Il donne aussi sur la figure 3.10 la fixation du bout de la colonne sur le volant en situation de fonctionnement réel. Cette deuxième figure montre que le bout supérieur de la colonne de direction est fileté ainsi que la présence d'un cône.

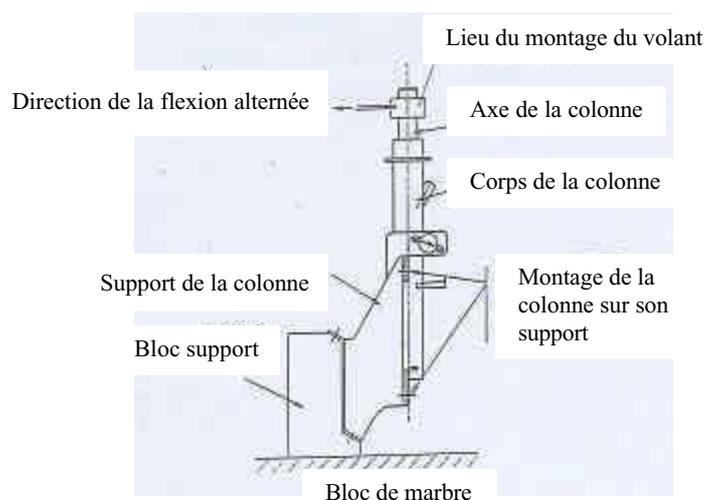


Figure 3.9 – Colonne de direction montée sur la machine d'essai

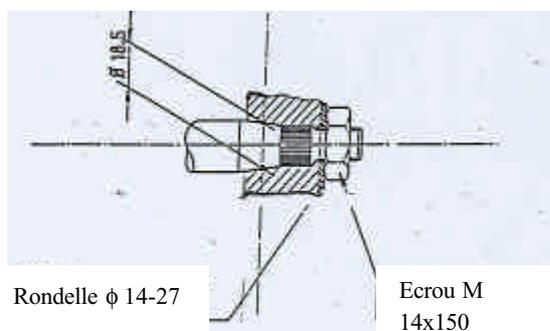


Figure 3.10 – Fixation du bout de la colonne de direction sur le volant

Les concepteurs du laboratoire ont commencé à concevoir le système. Ils ont proposé une solution qui consiste à produire le mouvement alternatif et l'effort de flexion pour les essais de fatigue. L'élément essentiel de ce système est un axe excentrique qui est entraîné en rotation par un moto-réducteur. Le modèle d'une partie de cette solution préliminaire est présenté sur la figure 3.11.

-
- résistance/poids : minimiser autant que possible le poids du sous-système, tout en gardant sa robustesse, de sorte qu'il puisse supporter un effort de 500 N sans subir de déformations notables pouvant influencer la course du bout de la colonne de direction qui sera de 0,5 mm de part et d'autre de la position neutre.
 - fabrication : tenir compte des moyens d'obtention des différents éléments du sous-système.
 - maintenance : faciliter l'entretien, le montage et le démontage du sous-système.

Les concepteurs doivent produire un modèle CATIA V5 du sous-système en contexte, assemblé au système. Il est autorisé :

- des changements sur la position de la colonne dans son support, mais sans modifier son modèle CAO ;
- la possibilité de modifier au besoin le modèle de l'axe excentrique, sans changer l'amplitude de l'excentricité et le modèle des paliers qui le portent ;
- la possibilité d'ajouter au besoin d'autres éléments à n'importe quel endroit du modèle.

Recommandations sur l'utilisation de CATIA V5 :

- il faut concevoir les pièces au maximum en contexte d'assemblage lorsque cela est possible ;
- il ne faut pas oublier de privilégier l'utilisation des différentes fonctions 3D par rapport à l'utilisation systématique de l'atelier d'esquisse pour les constructions de vos pièces ;
- dans la conception, il faut penser à faciliter le passage des pièces à la FAO, c'est-à-dire de concevoir, si possible, les pièces comme elles seront fabriquées.

3.4.2 Quelques éléments d'analyse du problème de conception

Nous avons nous même résolu au préalable le problème de conception en essayant de faire ressortir plusieurs solutions au problème et quelques éléments susceptibles de se produire au cours du processus de conception lors de l'expérience. Compte tenu du profil des acteurs que nous avons choisis pour nos expériences, ceci nous a conduits à vérifier que les caractéristiques du problème de conception choisi étaient conformes à celles données par [DOR 1996] et présentées dans le deuxième chapitre.

Ceci étant, nous allons maintenant réintroduire section par section le problème de conception et l'analyser en tenant compte des interprétations faites par les concepteurs pendant l'expérience.

Un constructeur automobile demande à un laboratoire de faire des essais de fatigue en flexion alternée symétrique, d'amplitude un millimètre et de fréquence d'environ trois Hertz, sur une colonne de direction. Le laboratoire en question a la responsabilité de concevoir une machine devant servir à cet effet. Le constructeur met à la disposition du laboratoire un schéma (figure 3.9) présentant la colonne de direction montée au système. Ce schéma montre tout simplement comment la colonne sera fixée au système et dans quelle direction les essais de flexion devraient être faits. Il donne aussi sur la figure 3.10 la fixation du bout de la colonne sur le volant en situation de fonctionnement réel. Le but de cette deuxième figure est de montrer que le bout supérieur de la colonne de direction est fileté.

Cette première partie du problème présente le client (un constructeur automobile) et une société de conception (un laboratoire) disposant d'un savoir faire technique qui lui permet de résoudre le problème du constructeur automobile sous la forme présentée. Les spécifications données par le constructeur sont assez vagues et donnent une grande liberté d'action au laboratoire. L'idée du produit est implicitement introduite. Même si le constructeur automobile a déjà une vague idée du montage de la colonne de direction au système, il n'en a pratiquement pas pour ce qui concerne la structure même du système, encore moins des conditions expérimentales qui sont de la compétence du laboratoire.

Les étudiants choisis comme acteurs pour l'expérience sont dans une Université de Technologie située dans une région dominée par les systèmes de transport. L'idée de résoudre un problème impliquant un constructeur automobile peut augmenter grandement leur motivation. De par leur parcours, il y a très peu de chance qu'ils aient eu à rencontrer un problème similaire. Pour eux, le problème est donc parfaitement nouveau.

Le problème posé est bien réaliste, dans la mesure où il met en exergue une situation qui s'est déjà produite, même si ce n'était pas dans le même contexte.

Les concepteurs du laboratoire ont commencé à concevoir le système. Ils ont proposé une solution qui consiste à produire le mouvement alternatif et l'effort de flexion pour les essais de fatigue. L'élément essentiel de ce système est un axe excentrique qui est entraîné en rotation par un moto-réducteur. Un schéma de cette solution est présenté sur la figure 3.11.

Cette partie est très importante pour approfondir la compréhension du problème qui a été donné dans le paragraphe précédent en termes plutôt vagues. Elle fixe le cadre du travail du concepteur en donnant un début de solution au problème. Le modèle CAO d'une partie de la solution a été très utile. C'est toujours à lui que les concepteurs se sont référés pour asseoir leur compréhension et pour faire leurs analyses du problème de conception.

On vous demande de concevoir le sous-système qui transmettra le mouvement de l'excentrique à la colonne de direction. Un dessin de l'axe excentrique seul est présenté sur la figure 3.12 en fin de ce document. Les critères à prendre principalement en compte sont les suivants :

- Maintenance : faciliter l'entretien, le montage et le démontage du sous-système*
- Fabrication : tenir compte des moyens d'obtention des différents éléments du sous système*
- Résistance/poids : minimiser autant que possible le poids du sous-système, tout en gardant sa robustesse, de sorte qu'il puisse supporter un effort de 500N sans subir de déformations notables pouvant influencer la course du bout de la colonne de direction qui sera de 0,5 mm de part et d'autre de la position neutre.*

Vous devez produire un modèle CATIA V5 du sous-système en contexte, assemblé au système. Il vous est autorisé :

- Des changements sur la position de la colonne dans son support, mais sans modifier son modèle CAO.*
- La possibilité de modifier au besoin le modèle de l'axe excentrique, sans changer l'amplitude de l'excentricité, ni des paliers qui le portent.*
- La possibilité d'ajouter au besoin d'autres éléments à n'importe quel endroit du modèle.*

C'est dans cette partie que le problème à traiter par les concepteurs pour l'expérience est posé de façon explicite. Vu le profil des concepteurs, on a notamment insisté sur certains critères à prendre en compte pour qu'ils ne les perdent pas de vue. On a aussi énuméré les limites d'action des concepteurs sur le modèle CAO représentant le début de la conception. Ceci vise à cadrer le travail des concepteurs et leur permettre de bien avancer dans le temps imparti.

Le détail B de la figure 3.12 a été prévu pour montrer l'amplitude de l'excentrique et l'endroit où viendra éventuellement s'emmancher le sous-ensemble à concevoir.

Compte tenu de la faible valeur de l'excentricité sur l'axe, il n'était pas évident de le percevoir directement sur le dessin de l'axe excentrique, encore moins sur le modèle CAO de la conception préliminaire. Il était donc indispensable de présenter ce détail avec précision. Malgré cette précaution, certains acteurs ont passé un temps considérable à percevoir l'excentricité de l'axe.

Ainsi présenté et analysé le problème de conception, nous passons maintenant à l'organisation de l'expérience proprement dite.

3.5 Organisation de l'expérience

3.5.1 Phases expérimentales

Avec le même problème de conception, quatre acteurs/concepteurs ont participé à la conception dans les mêmes conditions expérimentales. Les concepteurs ont été accueillis par les expérimentateurs et ont ensuite pris connaissance des instructions pour l'expérience. Ils ont tous commencé par un exercice d'entraînement pour s'habituer avec la méthode du CTA utilisée dans l'expérience comme recommandé par Ericsson et Simon [ERI 1993] et repris par

Gero *et al.* [GER 2001]. Dans la deuxième phase, les concepteurs étaient amenés à concevoir en verbalisant toutes leurs pensées à haute voix sans les expliquer, ni les justifier (CTA). La troisième phase était un débriefing constitué d'une série de questions-réponses entre l'expérimentateur et le concepteur. Dans la quatrième phase, la méthode du RTA est utilisée. On a mis le concepteur devant le modèle CAO qu'il a produit pendant son travail et on lui a demandé de fournir à un expérimentateur qui n'avait pas assisté aux phases précédentes, toutes les idées et intentions qui ont été à la base de sa conception.

Pour chacune de ces quatre phases, le déroulement de l'expérience va être présenté dans la section suivante en introduisant progressivement dans les encadrés les instructions données suivies des commentaires correspondants. Ces instructions sont tirées d'une documentation plus complète que nous avons présentée en annexes 1 et 2. Ces annexes présentent le document qui a été préparé et a permis à l'expérimentateur de diriger les expériences et les documents qui ont été donnés au concepteur pour l'instruire du problème de conception et de la conduite à tenir pendant les expériences.

3.5.2 Déroulement des différentes étapes de l'expérience

Après avoir décrit comment l'expérience a été organisée en donnant les documents destinés aux concepteurs et aux expérimentateurs, nous allons à présent donner une brève analyse des différentes parties des instructions et nous introduirons ensuite la présentation générale du déroulement des expériences. Nous ferons apparaître les instructions dans des encadrés et les éléments d'analyse hors encadrés.

3.5.2.1 Accueil et prise de connaissance de la partie principale des instructions du CTA

Nous vous remercions d'avoir accepté de participer à cette séance expérimentale. Prenez place sur cette chaise.

Nous sommes particulièrement intéressés par la compréhension de la conception. Comme nous voulons comprendre vos pensées pendant votre travail de conception, nous vous donnerons un problème de conception que nous vous prions de résoudre en verbalisant vos pensées à haute voix.

Autrement dit, nous vous demandons de verbaliser continuellement vos pensées tout au long de la session. Faites comme si vous vous parlez à vous même, mais assez fort pour être audible dans l'enregistrement. Comportez vous comme si vous étiez seul dans la salle. En fait notre présence n'a pour seul but que de veiller au bon déroulement de l'expérience et pour veiller au bon fonctionnement du matériel. Ne vous occupez pas de notre présence. Vous n'avez donc pas besoin d'expliquer, ni de justifier vos pensées. Rationnez de la façon la plus naturelle possible.

La session sera enregistrée en audio/vidéo et analysée plus tard.

Après la phrase d'accueil du concepteur, l'expérimentateur commence par expliquer au concepteur le but de l'expérience, il introduit directement comment la session se déroulera, tout en prenant soin de préciser au concepteur qu'il sera enregistré. Il entre dans le cœur des instructions en expliquant au concepteur de verbaliser ses pensées, en travaillant le plus

naturellement possible. Il rassure le concepteur en lui expliquant son rôle dans la salle. Comme préconisé dans la bibliographie [ERI 1993], il insiste davantage sur les instructions et les présente de manières différentes pour bien faire comprendre au concepteur leur importance. Il insiste surtout sur le fait de résister à toutes les tentations d'expliquer ou de justifier la pensée, en enlevant toute les raisons qui peuvent amener le concepteur à le faire.

3.5.2.2 Exercice d'entraînement

Pour vous familiariser avec la méthode, nous allons vous faire faire un exercice d'entraînement de 10 minutes environ. Essayez de résoudre le problème en pensant à haute voix. Ne vous préoccupez pas du fait que vous n'aurez pas résolu le problème après les 10 minutes, car c'est seulement un exercice d'entraînement pour vous familiariser avec la méthode de la verbalisation qui sera utilisée pour la session expérimentale.

L'expérimentateur introduit l'exercice d'entraînement, tout en prenant soin de préciser la raison de cet exercice. Il insiste à nouveau sur l'instruction principale, qui est la pensée à haute voix, pour que le concepteur l'intègre bien lors de la résolution de l'exercice. Le but n'étant pas de résoudre le problème posé dans l'exercice d'entraînement, les expérimentateurs prennent le soin de préciser au concepteur de ne pas s'inquiéter même s'ils n'ont pas entièrement résolu ce problème après les 10 minutes de l'exercice.

Pendant ces 10 minutes, si le concepteur marquait une pause de plus de 30 secondes de silence, l'expérimentateur lui rappelait d'exprimer verbalement ses pensées par l'instruction « verbalisez ». Il l'interpellait, par l'instruction « pas de justification », s'il passait à la verbalisation sociale. Et s'il y avait un risque que le son dans l'enregistrement audio/vidéo ne soit pas bon, il l'interpellait par l'instruction « plus fort ». Ces instructions sont les seules qui ont été utilisées dans l'exercice d'entraînement et plus tard dans l'expérience proprement dite.

Il avait également été prévu que l'exercice d'entraînement puisse être renouvelé au besoin avec d'autres problèmes, pour améliorer les aptitudes du concepteur à verbaliser ses pensées à haute voix, jusqu'à ce que les expérimentateurs aient eu la certitude que le concepteur s'était familiarisé avec la méthode du CTA. Cela ne s'est finalement pas avéré nécessaire. Ensuite, on pouvait passer sereinement aux parties centrales de l'expérience en commençant par la méthode du CTA.

3.5.2.3 Protocole du CTA

Le concepteur entre ici dans les phases expérimentales proprement dites. Il est appelé à concevoir et à verbaliser simultanément ses pensées, sans explications ni justifications.

Dans un premier temps, nous introduirons les instructions dans des encadrés et nous en ferons une brève analyse. Dans un second temps, nous présenterons le déroulement expérimental pour cette phase ainsi que les solutions (modèle CAO) obtenues en fin de séance du protocole du CTA.

3.5.2.3.1 Application des instructions pour la méthode du CTA

Nous introduisons ici les instructions en deux parties : la première donnée avant le début du protocole du CTA et la seconde donnée pour l'interrompre.

Partie 1

Nous allons maintenant vous faire prendre connaissance du problème de conception en vous donnant un cahier des charges écrit pour le produit à concevoir.

Si vous avez besoin d'informations additionnelles, nous vous prions de nous le demander. S'il vous plaît, soyez spécifique dans les questions que vous poserez. Nous ferons tout notre possible pour vous donner des réponses satisfaisantes. À part cela, essayez d'ignorer notre présence dans la salle, surtout pendant vos pensées et réflexions.

Nous vous demanderons de concevoir un modèle CAO du produit à partir de la station de travail CATIA V5 à votre disposition. Vous avez aussi du papier, des stylos, des crayons et des marqueurs pour faire des croquis, des dessins ou des notes. Avant de vous donner le cahier des charges du produit, avez-vous des questions sur la procédure ?

Vous avez deux heures pour achever votre conception.

Nous vous rappelons que vous devez essayer d'exprimer à haute voix vos pensées et vos réflexions concernant toute votre activité pendant la session, sans toutefois chercher à expliquer quoi que ce soit. Vous devez le faire comme si vous le faisiez pour vous même mais à haute voix de manière à ce qu'il soit enregistré dans de bonnes conditions.

L'expérimentateur introduit le problème de conception pour l'expérience. Il précise au concepteur comment le travail doit être mené et le matériel disponible pour le faire. Il laisse au concepteur le temps de lire les instructions et lui demande s'il a des questions à ce sujet, ceci pour minimiser les biais et questions du concepteur lors de la séance expérimentale. Ici, l'expérimentateur a des informations complémentaires sur des documents qui étaient destinés à être donné au concepteur sur demande. Mais pratiquement, les informations demandées par les concepteurs au cours de la séance expérimentales ont été données verbalement.

Comme recommandé par Ericsson et Simon [ERI 1993], l'expérimentateur précise à nouveau, avant le début de la séance, les instructions complémentaires au concepteur pour la méthode du CTA utilisée dans cette partie.

Partie 2

Compte tenu de l'état d'avancement du protocole et avant les deux heures prévues et annoncées au concepteur au début de cette phase, l'expérimentateur arrête la séance comme suit :

Le temps que nous avons prévu pour cette première partie est achevé. Pour atteindre les objectifs de notre recherche, nous avons prévu qu'un autre concepteur prendra la suite de votre travail. Ne vous soucier donc pas du fait que vous n'avez pas fini avec votre conception. Nous vous invitons à répondre aux questions concernant le déroulement de l'expérience.

Nous avons effectivement prévu deux concepteurs avec un passage de relais. Pour ne pas influencer le comportement du premier concepteur, il avait été décidé de ne pas lui présenter le problème de la sorte. Ainsi, au début de la conception, il sait qu'il a une pièce à concevoir et qu'en deux heures il fournira une solution complète. Mais avant ces deux heures,

l'expérimentateur décide de l'arrêter pour qu'un autre concepteur prenne sa suite et achève la conception. Aussi, il est apparu important de rassurer le concepteur dès cet arrêt en lui précisant qu'il avait été prévu qu'un autre prendra sa suite.

3.5.2.3.2 Déroulement du CTA et présentation des solutions pour chaque concepteur

Pendant cette phase, les concepteurs ont eu des habilités diverses à verbaliser et à travailler simultanément. Cependant, on a noté pour chacun d'eux des temps de pauses marqués surtout lors de la production des dessins à main levée et de la création des entités géométriques par le logiciel utilisé. Ceci est conforme à ce qui a été déjà largement démontré dans [CRO 1996], d'où la nécessité de se munir des dessins et des modèles géométriques, en plus de la transcription écrite de la verbalisation, lors de l'analyse de l'activité de conception, pour bien couvrir tout le processus de conception.

La résolution du problème par les quatre concepteurs s'est faite de façon relativement méthodique. Ils ont tous fait une analyse et une synthèse du problème suivi d'une production, d'une analyse et d'une évaluation des solutions.

Analyse et synthèse du problème de conception

L'analyse du problème par les quatre concepteurs leur a permis de comprendre tout de suite qu'il s'agit en fait de concevoir un système qui permettra la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation alternée d'amplitude 1mm. Ainsi synthétisé, le premier élément disponible est tout simplement le système existant, plus exactement l'axe excentrique entraîné en rotation par un moto-réducteur et le bout de la colonne de direction destinée à recevoir le mouvement de translation produit par le sous-ensemble à concevoir. C'est du moins ce qui est apparu de la compréhension du problème par les quatre concepteurs. Deux d'entre eux ont cependant eu un peu de peine à trouver l'axe excentrique sur le modèle CAO préliminaire, du fait de la faible valeur de l'excentricité et malgré les détails prévus pour expliciter ce point.

Pendant cette phase, les concepteurs naviguaient dans le système et manipulaient beaucoup plus leur modèle géométrique. Ils alternent leur attention entre le modèle CAO préliminaire et le problème de conception. Pendant la production des solutions, l'analyse du problème pouvait encore survenir. En effet, nous avons constaté que chaque concepteur faisait la conception du sous-ensemble pièce par pièce et au début de la conception de chaque pièce il procédait à une nouvelle analyse du problème. Pendant cet instant, il lui arrivait d'être amené à lire certains paragraphes ou à insister plusieurs fois sur certaines parties de l'énoncé du problème. Ceci nous amène à supposer qu'après les premières lectures du sujet, il avait juste une vue assez générale, mais non détaillée, de ce qu'il devait développer.

Production, analyse et évaluation des solutions

Le début de la production des solutions varie d'un concepteur à l'autre. Il est toujours survenu après la lecture complète (une ou plusieurs fois) du sujet. Nous avons constaté qu'après cette lecture, les concepteurs avaient d'abord une idée assez générale de la solution à développer. Pour chacun d'eux, cette idée générale est représentée à main levée sur un croquis, le plus souvent peu compréhensible par quelqu'un d'autre. Le concepteur, qui comprend bien ce qu'il a représenté s'en servira plus tard lors de la création du modèle géométrique du produit à l'aide de l'outil CAO.

La production des solutions s'est faite par rapport aux points suivants : la structure physique du système, sa fonction, la maintenance (montage/démontage), la fabrication et quelquefois l'aspect esthétique, ont été abordés. Nous avons en outre constaté que chaque concepteur créait son sous-ensemble pièce par pièce les unes après les autres, suivant leur disposition. Il évoluait, soit de l'axe excentrique à la colonne de direction, soit de la colonne de direction à l'axe excentrique. Aucun des concepteurs n'a attaqué le problème des deux côtés à la fois.

Les solutions produites étaient ensuite analysées, et évaluées par rapport aux spécifications du problème de conception au fur et à mesure de l'évolution de la conception.

À la fin de la séance expérimentale, le modèle CAO produit par chaque concepteur était variable de l'un à l'autre. Ces solutions sont présentées sur les figures 3.13 à 3.16 pour les quatre concepteurs participants. Il convient de noter que ces représentations ne sont pas des solutions complètes au problème dans la mesure où la durée de l'expérience avait été fixée par avance. Le concepteur a été interrompu avant la fin de la conception.

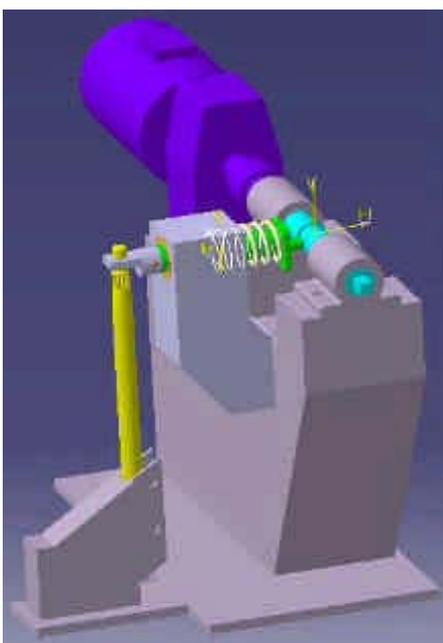


Figure 3.13 – Solution concepteur 1

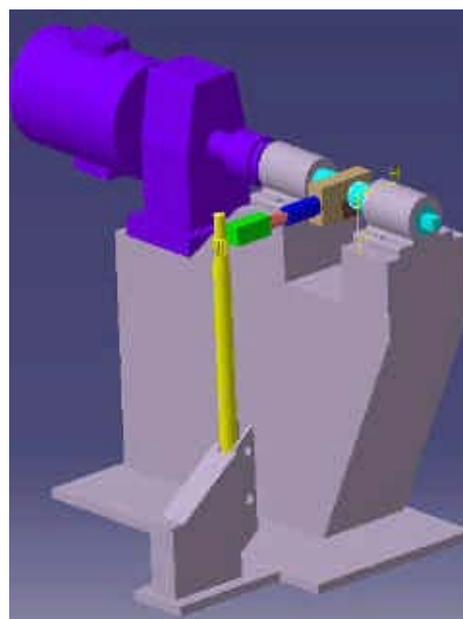


Figure 3.14 – Solution concepteur 2

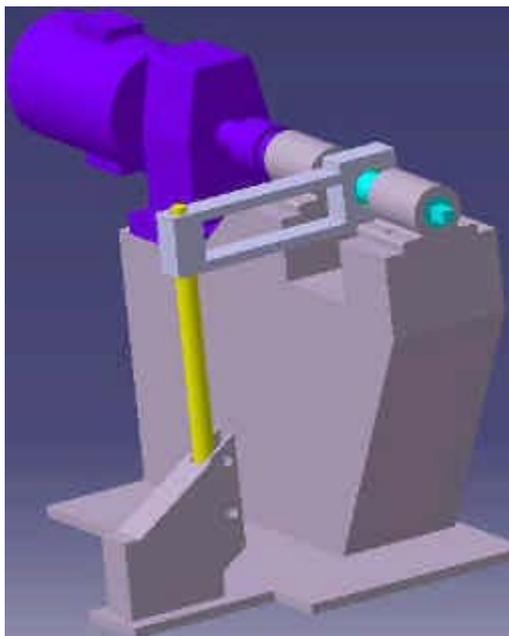


Figure 3.15 – *Solution concepteur 3*

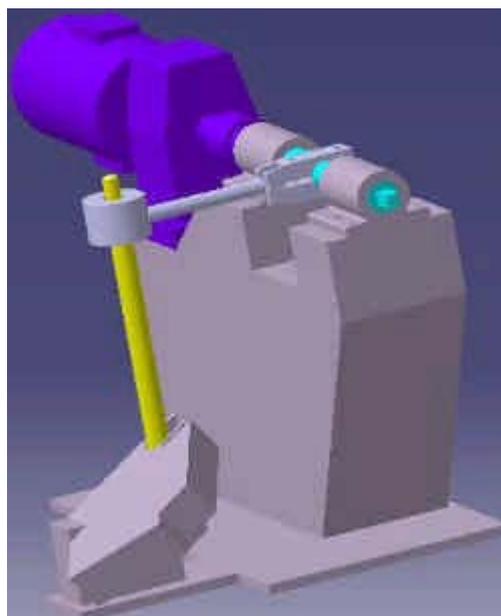


Figure 3.16 – *Solution concepteur 4*

3.5.2.4 Débriefing

Immédiatement après la fin du temps alloué à la partie du protocole correspondant au CTA, un débriefing a été fait dans un court entretien constitué d'une série de questions/réponses entre le concepteur et l'expérimentateur. Les questions, présentées dans le document expérimentateur (annexe 1) sont reprises dans l'encadré ci-dessous.

Nous vous invitons à répondre aux questions suivantes :

1. *Que pensez-vous de ce sujet ?*
2. *Êtes-vous satisfait du résultat que vous avez réussi à réaliser ?*
3. *Quels sont les types d'informations qui étaient particulièrement utiles ?*
4. *Qu'avez-vous trouvé en particulier difficile dans le projet ?*
5. *Avez-vous vraiment réussi à ignorer notre présence ? Si non, quelle influence notre présence dans la salle avait sur vous ?*
6. *Avez-vous été tenté d'expliquer vos idées comme si vous ne l'exprimiez pas pour vous même ?*

Les réponses aux questions sont données au fur et à mesure qu'elles ont été posées verbalement par l'expérimentateur. Nous introduisons chaque question et nous analyserons les réponses données pas les concepteurs.

Question 1 : que pensez-vous du sujet ?

À cette première question, chaque concepteur a admis que le sujet en lui même était intéressant. Cependant, trois des quatre concepteurs ont fait part des préoccupations spécifiques qu'ils ont eues.

Pour le concepteur 1, le sujet était à sa portée et il était capable de boucler et de trouver une solution finie et plus intéressante, si on lui avait laissé plus de temps.

Le concepteur 2 a admis avoir eu du mal à mettre les éléments du problème bout à bout pour bien définir ce qui était attendu de lui.

Le concepteur 3 a trouvé qu'il manquait certaines informations communément contenues dans des bouquins où il aurait pu trouver des solutions technologiques standard pour certaines parties de sa solution.

Le concepteur 4 a déclaré que l'excentricité était très petite et qu'il avait eu du mal à la visualiser.

Question 2 : êtes-vous satisfaits du résultat que vous avez réussi à réaliser ?

Chacun des quatre concepteurs a précisé que le résultat fourni restait encore à peaufiner et à finaliser. Leurs ressentis globaux ont été un peu plus mitigés.

Le concepteur 1 a affirmé, sans hésiter, être satisfait de son résultat tout en mentionnant qu'il y avait encore des petits détails qu'il aurait pu améliorer.

Le concepteur 2, par contre, a affirmé ne pas être totalement satisfait. Il trouve que le résultat qu'il a fourni est encore un tout petit peu brouillon et que la solution technique devait encore être peaufinée.

Quant au concepteur 3, il affirme que son résultat serait assez difficile à finaliser, mais que c'était sur la bonne voie tout de même.

Pour le concepteur 4, il estime qu'on n'est jamais totalement satisfait d'un résultat. Il trouve assez intéressant ce qu'il a fait jusqu'ici, avec quelques modifications à faire.

Question 3 : quelles sont les types d'informations qui étaient particulièrement utiles ?

Tous les quatre concepteurs affirment que c'était important de rappeler l'utilité de la simplicité des contraintes de fabrication et de maintenance (faciliter le montage et le démontage des éléments du sous-système). L'effort de 500 N pour l'optimisation de la matière et les détails sur l'excentricité leur sont apparus aussi importants.

Question 4 : qu'avez-vous trouvé en particulier difficile dans le projet ?

À part l'excentricité de faible valeur (0,5 mm) et certaines fonctions à réaliser par le système CAO, les quatre concepteurs n'ont pas trouvé de difficultés particulières et ont trouvé que le projet était largement à leur portée.

Question 5 : avez-vous vraiment réussi à ignorer notre présence ? Si non, quelle influence notre présence dans la salle avait sur vous ?

Chaque concepteur a reconnu que la présence de l'expérimentateur n'a presque pas eu d'influence sur eux dans la mesure où la plupart du temps, il était profondément absorbé par les réflexions sur la conception. Cependant, deux des quatre concepteurs en ont rajouté en affirmant qu'ils ont eu quelques retenues au début de la conception parce qu'ils n'étaient pas détachés à l'idée qu'ils étaient observés et avait tendance à s'expliquer.

Question 6 : avez-vous été tenté d'expliquer vos idées comme si vous ne l'exprimiez pas pour vous même ?

Les quatre concepteurs reconnaissent que pendant la majeure partie du protocole, ils ont exprimé leur pensée comme s'ils le faisaient pour eux-mêmes. Cependant, trois des quatre concepteurs reconnaissent tout de même qu'il leur est arrivé quelque rares fois de vouloir s'expliquer, surtout quand ils perdaient le sentiment d'être seul dans la salle et se sentaient observés.

3.5.2.5 Protocole du RTA

Dans cette phase, les concepteurs sont appelés à verbaliser leurs pensées après avoir achevé la conception. Ils doivent recourir aux informations dont une partie est stockée dans la mémoire à court terme et une autre dans la mémoire à long terme. Or, les caractéristiques de la mémoire humaine ne permettent pas toujours de recouvrer toutes les informations stockées dans la mémoire à long terme. Des stimuli sont parfois nécessaires pour y parvenir suivant la nature des informations qu'on veut recouvrer. C'est ainsi que [SUW 1998] préconise l'utilisation des bandes vidéo de l'enregistrement de la session de conception pendant la rétrospection, pour assister le concepteur dans le rappel de ses pensées.

Pour ce qui nous concerne, nous avons pour objectif d'évaluer les capacités du modèle CAO à restituer toutes les intentions de conception à l'origine de sa création. Pour cela, nous avons choisi, lors de nos protocoles rétrospectifs, d'utiliser seulement le modèle CAO produit à la fin de la séance du protocole du CTA, comme stimulus.

Après une pause café (20 à 30 min après la fin du débriefing), on a fait à nouveau appel à chaque concepteur et un expérimentateur autre que celui présent dans le protocole du CTA et du débriefing, qui lui a données les instructions correspondant à cette phase. Ces instructions sont assez simples. Elles ont été présentées dans le document pour les expérimentateurs (annexe 1) et reprises dans l'encadré ci-dessous.

Comme nous l'avons déjà souligné, nous faisons à nouveau appel à vous pour une séance rétrospective.

Nous vous invitons maintenant à expliquer les pensées, les idées et les intentions que vous avez eues pendant votre séance de travail.

Vous pouvez vous servir du modèle CAO du produit que vous avez conçu. Sur ce modèle CAO, nous vous invitons à vous servir éventuellement de l'arbre des spécifications, pour expliquer les raisons de l'existence de chaque entité et si possible des différentes contraintes.

Le concepteur est appelé à se servir du modèle CAO de sa conception à la fin du CTA pour expliquer verbalement les intentions qu'il avait quand il construisait chaque détail du modèle. Comme l'historique de la création du modèle est répertorié dans « l'arbre des spécifications » développé par l'outil CAO CATIA V5 utilisé dans l'expérience, il lui est demandé de s'en servir au besoin pour expliciter ses intentions.

L'expérimentateur laisse d'abord le concepteur verbaliser sans l'interrompre. Ce n'est qu'après qu'il lui pose des questions sur des parties pour lesquelles il n'a pas verbalisées. Ces questions sont considérées comme des stimuli supplémentaires et lui permettront de donner davantage d'explications sur des intentions qu'il n'aurait pas pu verbaliser autrement.

Quand tout ceci est fait, l'expérimentateur remercie chaleureusement le concepteur et met fin à l'expérience. Les données brutes obtenues doivent alors être organisées et analysées. Cette organisation est faite dans la prochaine section de ce chapitre.

3.6 Qualité de la verbalisation dans les protocoles

Nous avons entrepris de vérifier la qualité de la verbalisation dans les protocoles du CTA de chaque concepteur. Pour ce faire, nous avons utilisé le même procédé que dans la section 3.2.2. Nous avons retranscrit et segmenté le CTA. Chaque segment a été catégorisé par le code CTA ou VS. Le code CTA catégorise chaque segment qui fait référence à la verbalisation de la pensée à haute voix et le code VS à la verbalisation sociale. Le résultat obtenu est présenté dans le tableau 3.2 pour chaque concepteur.

	Concepteur 1		Concepteur 2		Concepteur 3		Concepteur 4	
VS	137	12	230	24	187	18	211	21
CTA	1001	88	728	76	853	82	793	79
TOTAL	1138	100	958	100	1040	100	1004	100

 = Nombre

 = Pourcentage

Tableau 3.2 – Qualité de la verbalisation dans les protocoles du CTA

Nous constatons la présence de la verbalisation sociale dans chaque protocole à des degrés variés dépendant de l'aptitude de chacun à verbaliser ses pensées. Cependant, nous remarquons qu'elle a diminué dans les nouveaux protocoles par rapport à l'expérience préliminaire présentée en début de ce chapitre (voir figure 3.7). Cette diminution peut être attribuée à toutes les précautions que nous avons prises et les instructions plus complètes qui ont été données aux concepteurs au début et au cours de l'expérience. Nous pouvons aisément conclure que la qualité de la verbalisation obtenue a été améliorée dans le CTA et que les résultats obtenus seront par conséquent plus fiables.

3.7 Présentation et organisation des données obtenues

Les éléments obtenus et qui seront nécessaires pour l'analyse de l'expérience sont essentiellement constitués des données verbales et visuelles et sont présentés sur la figure 3.17.

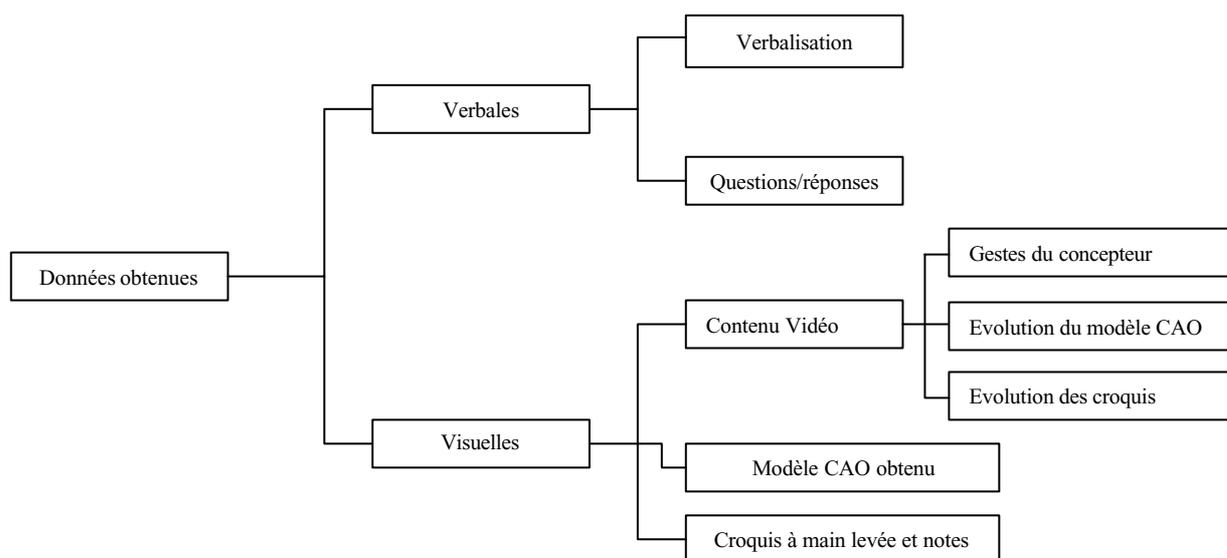


Figure 3.17 – Organisation des données brutes obtenues

Les données verbales sont contenues dans les enregistrements audio. Elles sont notamment constituées des verbalisations concurrente et rétrospective, ainsi que des questions/réponses entre l'expérimentateur et le concepteur pendant le débriefing.

Les données visuelles sont constituées des croquis à main levée, des notes, du modèle CAO obtenu en fin de séance expérimentale, ainsi que du contenu de l'enregistrement vidéo dans lequel on peut noter notamment les gestes du concepteur qui serviront à définir les instants où il prend ses notes, effectue des dessins à main levée, construit ou navigue dans son modèle CAO. On peut aussi noter dans ce contenu vidéo, l'évolution du modèle CAO et des croquis à main levée tout au long du protocole.

Ces deux types de données sont importants pour la compréhension du processus de conception. Il existe dans le protocole des parties dominées par le type visuel et des parties dominées par le type verbal. Ces deux types apparaissent très souvent alternativement ou en commun. Il apparaît qu'en analysant les données obtenues en fin de protocole sans regarder l'enregistrement vidéo de la séance expérimentale, il y a des informations auxquelles on n'a pas accès comme celles qui sont portées par les gestes du concepteur.

Ceci est conforme aux recherches de Akin *et al.* [AKI 1996] qui classent ces deux types de données dans leur modèle dual. Ils ont estimé que ce modèle appliqué à l'analyse de protocole est capable de faire voir lequel des types de données est particulièrement utile dans la capture de l'essentiel de l'activité de conception. Comme résultat, on peut avoir accès à l'importance de chacun d'eux dans tout le processus de conception. Ils arrivent à conclure que, ni les données verbales, ni les données visuelles prises seules ne peuvent permettre de comprendre adéquatement tout le processus de conception.

Il existe des instants dans le protocole où il n'y a que des données visuelles, des instants où il n'y a que des données verbales, des instants où les deux apparaissent simultanément et des instants où aucun des deux n'apparaît. Pendant les instants où les deux apparaissent simultanément, elles sont complémentaires dans la compréhension de cette partie de la conception. Une difficulté apparaît quand aucun des deux types n'apparaît. Dans ce cas, on pourrait procéder par déduction, en fonction du moment et de l'attitude du concepteur. Ces instants, bien que largement minoritaires tendent à justifier l'argument de Lloyd *et al.* [LLO 1996] selon lequel la méthode du CTA ne peut révéler toutes les pensées, mais seulement une partie des pensées. Nous pensons qu'en améliorant davantage la méthode de la verbalisation, ces parties peuvent être minimisées. Elles dépendent d'ailleurs de la capacité de chaque individu à extérioriser ses pensées. Ainsi, des quatre concepteurs intervenus dans nos expériences, ce temps a été bien variable d'un concepteur à l'autre. Pendant ces instants de silence où rien de visible n'est produit, nous pensons que le concepteur examine les documents de conception ou qu'il pense intensément conformément aux arguments projetés dans [CRO 1996].

3.8 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était la description des expériences que nous avons montées et analysées pour atteindre nos objectifs.

Après le descriptif du plan général de l'expérience, nous avons commencé par l'analyse d'une expérience préliminaire qui semblait être proche de nos attentes. Cette analyse nous a permis d'optimiser les conditions expérimentales pour nos expériences.

Au cœur du descriptif de nos expériences, nous avons commencé par le sujet de conception qui a été défini conformément à des caractéristiques prescrites dans la bibliographie pour de telles expériences.

L'organisation de l'expérience a été aussi commentée. Nous avons ainsi présenté les différentes phases expérimentales et l'objectif visé par chacune des phases. Les documents qui avaient été préparés pour les concepteurs et les expérimentateurs ont été présentés. Les documents pour les concepteurs contiennent notamment les instructions qui leurs sont données et sont introduites étape par étape. Le document pour les expérimentateurs contient aussi les instructions à donner, mais également la marche à suivre lors de la séance expérimentale à chaque étape.

Après l'organisation de l'expérience, nous sommes passés à la présentation du déroulement de l'expérience proprement dite. Chaque étape a alors été décrite et l'introduction progressive des instructions a été commentée. Dans cette partie, nous avons donné les modèles CAO produits par chaque concepteur en fin de séance expérimentale.

Enfin, les données brutes obtenues de l'expérience et qui seront utiles dans nos analyses ont été organisées et présentées. Ainsi, il nous est possible, dès lors, de présenter la structuration de ses données pour l'analyse. Cette structuration sera faite dans le prochain chapitre de cette thèse, où nous introduirons les résultats qui nous ont conduit à définir un modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO.

Chapitre 4

Analyse du CTA : modèle d'activité de conception à l'aide d'un outil CAO

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les premières analyses que nous avons faites à partir des données obtenues de l'expérience, après l'application de la méthode de CTA. De ces analyses, nous obtenons un premier résultat : un modèle d'activité de conception qui est un élément important pouvant servir à une meilleure compréhension du processus de conception à l'aide d'outil CAO.

Une structuration et un prétraitement des données obtenues des expériences seront d'abord présentés dans ce chapitre. Ensuite, nous présenterons les analyses que nous avons effectuées à partir de ces données structurées et prétraitées. Cette analyse nous conduira à la déduction d'un modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO, dont la base est présentée dans la quatrième partie de ce chapitre. Cette base comporte les différents éléments du modèle et leur classification en deux parties. Nous présenterons aussi une étude des liens entre ces différents éléments qui nous conduira à déduire notre modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO. Ce modèle sera explicitement présenté dans la quatrième partie de ce chapitre. Enfin, nous ferons une interprétation spécifique de quelques liens présents dans le modèle.

4.2 Structuration et traitement des données obtenues du protocole

Les données obtenues du protocole étaient très riches, mais non structurées. Pour avoir une compréhension détaillée de ces données, nous avons estimé qu'il était nécessaire de les prétraiter et de les structurer afin de faciliter leur analyse. Ce processus s'effectue par la segmentation et le codage séparés des données visuelles et des données verbales. Ces deux types de données, prétraités et structurés, seront remis ensemble lors de l'analyse.

Comme l'analyse et les résultats dépendront de la structuration des données, nous avons entrepris de nous assurer que la segmentation et le codage ont été faits adéquatement en étudiant leurs fiabilités.

4.2.1 Segmentation des données obtenues

Nous rappelons en d'autres termes que la segmentation est le processus qui consiste à diviser le protocole en petites unités porteuses de sens, instances du protocole général. En plus

de faciliter l'analyse, un autre rôle de la segmentation est d'identifier objectivement les transitions dans le protocole [ERI 1993].

Nous avons présenté les différentes méthodes rencontrées dans la bibliographie au deuxième chapitre de ce mémoire. Nous avons observé que la méthode utilisée par [GER 1998] était principalement basée sur les transcriptions de la verbalisation, alors que celle utilisée par [SUW 1998] était essentiellement basée sur les actions du concepteur, c'est-à-dire une partie des données observées à partir de la vidéo (données visuelles). Comme nous avons obtenu de nos expériences des données verbales et des données visuelles, nous avons adopté les deux méthodes, chacune au niveau où son efficacité était avérée.

Ainsi, pour la segmentation de nos données verbales, nous avons utilisé la même approche que [GER 1998] qui consiste à diviser le protocole suivant la ligne des intentions des concepteurs. Dans cette approche, un changement de l'intention du concepteur marque la fin d'un segment et le début d'un autre. Ici, nous avons aussi identifié les instants (ou segments) de pause où le concepteur ne fournissait aucune verbalisation.

Quant à la segmentation des données visuelles, elle a été faite à deux niveaux :

- Le premier concerne les gestes ou actions des concepteurs. Nous avons utilisé la même approche que [SUW 1998] qui utilise une méthode essentiellement basée sur les actions du concepteur sur leur dessin à main levée, vue à partir de l'enregistrement vidéo. Un segment correspond ainsi à un type d'actions. Il peut être composé de plusieurs segments verbaux.
- Le second concerne les éléments physiques manipulés ou transformés lors du protocole. Il s'agit notamment du problème de conception, des dessins à main levée et du modèle CAO. Nous avons affiné ce niveau en effectuant un découpage plus fin du modèle CAO obtenu en pièces constituant le sous-ensemble produit. Un segment à ce niveau peut également se composer de plusieurs segments verbaux.

Un exemple de cette segmentation, tiré du protocole du concepteur 1, est présenté dans le tableau 4.1.

Temps	Gestes du concepteur	Domaine du travail	Codes verbaux	Segments verbaux	
20'52	N	2	Ir	et je viens esquisser une géométrie supplémentaire sur cette face.	
20'58	Cs		Ir	Je trace mon cercle,	
21'12			Ic	Je vais le coter	
21'17			Rc	Est ce que 15 suffira ? Ehm....	
21'31			Ic	disons 13 mm, Je vais le coter à 13	
21'39	R		O	ça me paraît bien.	
21'46	Cs		Ic	Je vais mettre un chanfrein à 1mm pour faciliter l'assemblage,	
21'53	R		Rr	Donc, comment je vais faire mon coup ?	
22'00				Pause	
22'08	Cs		Ir	Je ressors de mon esquisse,	
22'12	N		O	Je vois que je n'y suis plus, oui !	
22'23	Cs		Ir	Je choisis cette fonction pour faire mon chanfrein	
22'40	N		1,2	Ic	donc il ne me reste plus qu'à faire l'assemblage entre les deux.
22'45			3	Ic	Une goupille, une bonne goupille me semble suffisante.

Tableau 4.1 – Exemple de segmentation

Dans ce tableau,

- la première colonne représente l'instant du protocole correspondant au début du déroulement des événements ;
- la deuxième colonne représente les segments de données visuelles correspondant aux gestes ou actions du concepteur ;
- la troisième colonne représente les segments de données visuelles correspondant au deuxième niveau de segmentation des données visuelles ;
- la quatrième colonne représente les codes des données verbales ;
- et la cinquième colonne présente la transcription de la verbalisation correspondant aux segments verbaux.

Les codes, dans les deuxième, troisième et quatrième colonnes, seront présentés et explicités dans la section 4.2.2 de ce chapitre.

4.2.2 Codages des données obtenues

Pour chaque segment obtenu, nous avons codé séparément les paroles (segments verbaux) et les actions (segments visuels) du concepteur.

Les catégories de codage que nous avons développées sont faites en fonction des types d'activité que nous avons vus apparaître dans le protocole. Comme [SUW 1998], la segmentation et le codage des données audio et vidéo ont été faits distinctement. Cependant, les types d'activités de conception observés sont différents, dans la mesure où nous avons étudié une séquence de conception faite avec un outil CAO en conception mécanique, alors que [SUW 1998] étudie des dessins à main levée en conception architecturale.

Les catégories de codage pour chaque type de données sont décrites séparément dans les sections suivantes.

4.2.2.1 Catégories de codage des données verbales

Les activités détectées à l'aide de la verbalisation sont : les observations, les raisonnements de conception, les formalisations des intentions de conception, les raisonnements pour la représentation, les formalisations des intentions de représentation. Nous les avons considérées comme les catégories de codage pour les segments issus de la verbalisation. Ces catégories de codage de segments verbaux ainsi que les codes associés sont présentés sur la figure 4.1.

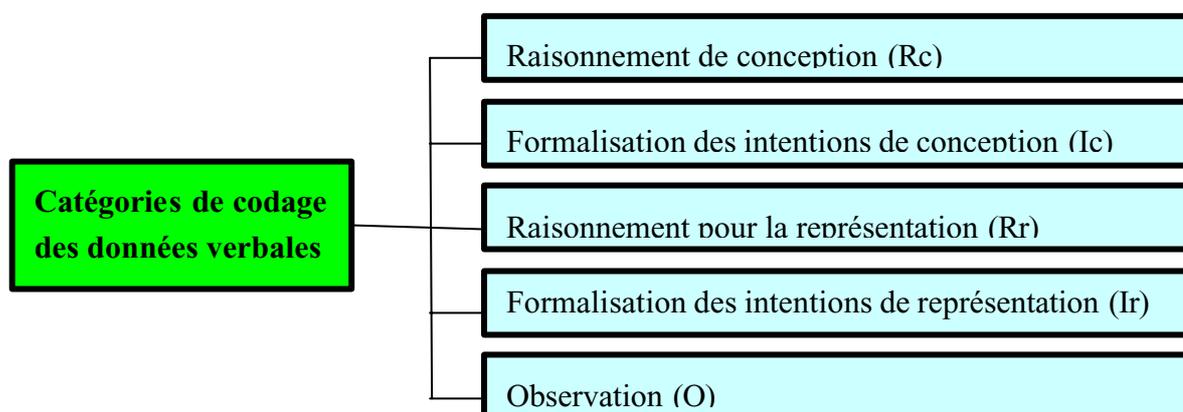


Figure 4.1 – *Catégories de codage correspondant aux données verbales*

Les définitions de ces différents codes associés aux segments verbaux sont les suivants :

- **O (Observation)** : code tous les segments qui font référence au regard porté sur le problème de conception, le dessin à main levée ou le modèle CAO en construction, pour capter des informations. Dans cette rubrique, on inclut les segments qui font référence aux éléments d'appréciation ou de description du modèle CAO déjà construit. On peut observer pour évaluer, pour examiner, pour comprendre, pour construire, pour analyser. Nous avons, dans un deuxième temps, distingué deux types d'observation : l'observation pour la conception (Oc) et l'observation pour la représentation (Or). Ils seront davantage explicités au chapitre 5 lors de leur utilisation dans les analyses.

-
- **Ic (Formalisation de l'Intention de Conception)** : code tout les segments qui font référence aux exigences demandées dans le problème de conception ou à tout ce qui est projeté pour contribuer au développement de la conception.
 - **Rc (Raisonnement de conception)** : code tous les segments qui font référence à un processus cognitif du concepteur portant sur la conception. Cette rubrique concerne aussi les éléments de description, d'explication ou de justification portant sur une intention de conception déjà formalisée ou non.
 - **Ir (Formalisation de l'Intention de représentation)** : code tous les segments qui font référence à tout ce qui est projeté et qui est lié spécifiquement à la manipulation des outils CAO ou qui contribue directement à la représentation de la conception sur un support papier (croquis) ou numérique (modèle CAO).
 - **Rr (Raisonnement pour la représentation)** : code tous les segments qui font référence à un processus cognitif, portant sur la manipulation de l'outil CAO. Nous admettons dans cette rubrique, les éléments de description, d'explication ou de justification portant sur une intention de représentation déjà formalisée.

En plus de ces différents codes, nous avons codé les instants où il n'y avait aucune verbalisation par des pauses.

Des exemples de segments codés sont présentés dans le tableau 4.1 de la section 4.2.1 ci-dessus.

4.2.2.2 Catégories de codage des données visuelles

Dans un premier temps, la vidéo nous a permis essentiellement de détecter les activités physiques dans le protocole. Elles se produisent quand le concepteur produit un geste observable. Il agit alors sur son modèle du produit en construction. Ce type de catégorie de données visuelles concerne les constructions et les navigations dans le modèle. On distingue également une activité passive (physiquement parlant). Elle se produit quand le concepteur regarde son modèle en construction sans aucun geste, ou effectue un geste en direction du modèle du produit sans agir directement sur lui. Ce type de catégorie a été nommé « simple regard ».

Dans un second temps, les catégories de codage ont été liées au domaine de travail. Nous avons distingué : le problème de conception, les dessins à main levée et le modèle CAO. Cette dernière catégorie a été à son tour divisée en sous-catégories identifiées par des chiffres, que nous présenterons au chapitre 5 lors de leur utilisation dans les analyses.

L'ensemble des catégories et les codes correspondants pour les segments de données visuelles sont décrits sur la figure 4.2.

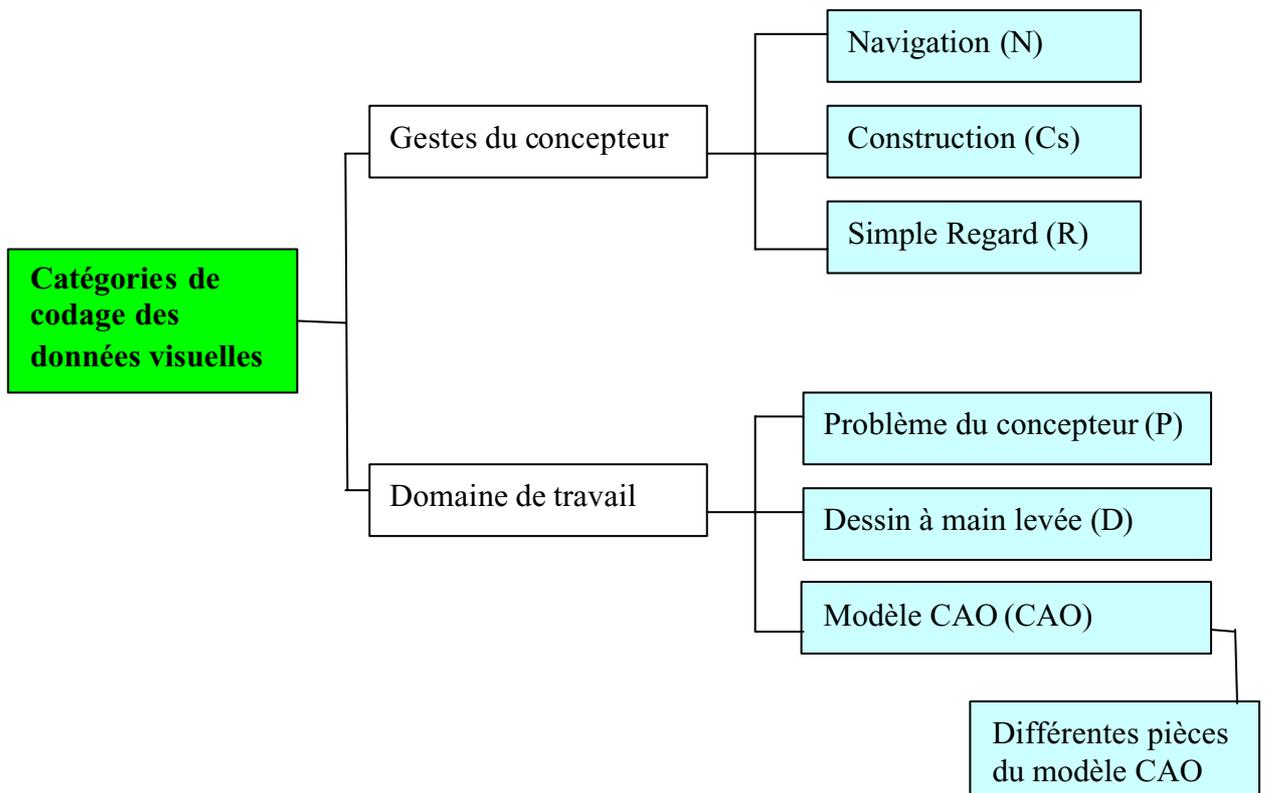


Figure 4.2 – *Catégories de codage correspondant aux données visuelles*

Les définitions des différents codes associés aux segments des données visuelles sont les suivants :

- **Cs (Construction)** : il fait référence à la matérialisation de la conception sur un support. Ce sont les moments où le concepteur fait son dessin à main levée ou construit son modèle CAO.
- **N (Navigation)** : il correspond aux déplacements, aux rotations ou aux zooms sur le modèle CAO. Les actions telles que : sauvegarder, cacher/montrer, régénération, rendu etc. ont été aussi classées dans la catégorie des navigations. En général, la navigation est constituée essentiellement d'actions qui consistent à manipuler l'outil CAO dans un autre but que la construction directe du modèle CAO.
- **R (Regard simple)** : il intervient lorsque le concepteur fixe un domaine de travail sans construire, ni naviguer.

Ainsi définies, nous constatons que nos premières catégories de données visuelles ont beaucoup de similitude avec les catégories physiques définies par [SUW 1998]. Ils les ont subdivisées en trois types d'actions :

- La D-action (*Drawing-action*), qui correspond aux descriptions sur le papier, tels que des diagrammes, figures, symboles, annotations, notes, et phrases.

- M-action (*Moving-action*) correspondant aux mouvements d'un crayon ou des mains suivant les descriptions physiques.
- L-action (*Looking-action*), qui concerne le regard porté sur des descriptions existantes.

La seule différence qu'il y a entre ces catégories et nos premières catégories de données visuelles est que nous les étendons à la CAO alors que [SUW 1998] se limite au croquis à main levée. Ainsi, D-action et M-action peuvent être rapprochées de nos catégories construction (Cs) et navigation (N) alors que L-action peut être rapproché du simple regard (R).

4.2.3 Fiabilité de la segmentation et du codage

Compte tenu de la possibilité des erreurs humaines dans l'action, nous avons commencé nos analyses par une étude de fiabilité de la structuration que nous avons effectuée sur les données obtenues. Ainsi, cette étude concerne la segmentation, la catégorisation et le codage des segments verbaux. Pour ce qui concerne les données visuelles, leur segmentation et leur codage ont été évidents et nous n'avons pas trouvé utile de réaliser une étude de fiabilité.

Deux méthodes d'étude de la fiabilité ont été décrites dans le chapitre 2. La méthode Delphi et celle de Delft. Il convient de préciser que les deux méthodes sont équivalentes dans la prédiction de la validité des résultats, dans la mesure où la méthode de Delft est inspirée de la méthode Delphi et peut même être considérée comme une variante de cette dernière.

Compte tenu des contraintes liées à la disponibilité des chercheurs nécessaires pour la méthode Delphi, nous avons opté pour la méthode de Delft où un seul expert est utilisé plusieurs fois pour la même tâche de façon différée dans le temps. Une comparaison et un compromis sont alors faits pour obtenir une segmentation et un codage final à partir des deux résultats obtenus.

Il s'est passé au moins dix jours entre les premières et les secondes opérations de segmentation et de codage et également dix jours au moins entre les secondes et les opérations d'arbitrage et de compromis. Pendant cette dernière étape, les différences entre les premières et les deuxièmes opérations de segmentation et de codage sont identifiées et sont examinées plus étroitement. Les secteurs dans les protocoles où les ambiguïtés peuvent exister et où les codes peuvent avoir besoin d'être améliorés sont examinés plus étroitement.

En comparant les résultats obtenus à chaque étape du processus, il nous est paru possible d'évaluer la robustesse de l'approche et d'identifier des secteurs qui peuvent être améliorés. Cette comparaison nous a aussi permis de valider nos résultats.

Nous avons ainsi pu établir un niveau d'accord pour les segmentations et les codages de chacun des protocoles. Les accords issus du compromis peuvent consister, soit à maintenir les résultats des premières ou des secondes opérations, soit à définir de nouvelles solutions intermédiaires plus satisfaisantes.

Il convient de noter qu'après la première segmentation de chaque protocole, nous sommes passés directement à la première opération de codage, avant d'aborder la deuxième segmentation, suivie par la deuxième opération de codage; ceci pour une meilleure optimisation du temps d'analyse.

4.2.3.1 Étude de la fiabilité de la segmentation

Les différences entre les premières et secondes segmentations concernent les endroits où il y a des changements au niveau des segments. Elles sont de deux types : les anomalies mineures et les anomalies majeures.

Les anomalies mineures de segmentation concernent les endroits où il y a de légères différences entre les débuts ou les fins des segments concernés. Ainsi, un segment peut commencer ou finir plus tôt ou plus tard dans les premières segmentations que dans les secondes segmentations. Le compromis, pour ce genre d'anomalie, est facile à obtenir. Il suffit juste d'identifier avec exactitude les endroits des débuts et des fins de ces segments selon les cas. Généralement, cela ne cause pas une grande influence sur le codage des segments concernés.

Un exemple d'anomalie mineure de segmentation existe à la 41ème minute dans le protocole du concepteur 1. Dans la première opération de segmentation, l'expert a commencé le nouveau segment après que les mots "par cela que je veux dire" tandis que dans la deuxième opération, ce segment commence avant ces mots. La recherche de compromis permet de voir que l'opération de la première segmentation était plus juste, ce qui permet de considérer le segment issu de cette opération comme segment final après compromis.

Les anomalies majeures de segmentation surviennent quand des segments sont identifiés dans l'une des opérations de segmentation et pas dans l'autre. Elles sont traitées comme des événements séparés et la décision quant à l'accord en vue de produire une segmentation finale est plus subtile. Une étude plus spécifique est nécessaire pour obtenir un compromis. Il est évident que ce genre d'anomalie de segmentation entraînera aussi des anomalies au niveau du codage.

Les critères de segmentation se sont fixés au début sur les intentions du concepteur. Cependant, quelques différences rencontrées entre les premières et les secondes segmentations peuvent être dues au fait que l'expert s'est habitué aux catégories de codage lors de l'analyse de la première expérience, qui a permis de se fixer les hypothèses. Ainsi, la

segmentation est désormais faite en tenant compte involontairement de ses catégories de codage.

Un des exemples tiré du protocole du concepteur 1 est décrit dans les segments suivants :

41 :10	donc je vais reprendre la distance... entre ça, l'axe là... et donc mes pièces... pièces... à quelle distance ? Je prends 37 mm...	Ic
--------	--	----

Ces mots constituent un seul segment lors de la première segmentation. Mais, à la seconde, ils sont découpés en quatre segments comme suit :

41 :10	donc je vais reprendre la distance...	Ic
41 :17..	entre ça, l'axe là..	O
41 :23..	et donc mes pièces... pièces... à quelle distance ?	Rc
41 :36	Je prends 37 mm...	Ic

Ceci a été fait ainsi parce que les catégories de codage définies et ancrées dans le subconscient de l'expert ont été involontairement prises en compte. On voit bien que ce genre de biais aura de l'influence, tant sur le nombre de segments que sur les nombres de chaque catégorie. Ceci dénote le genre d'ambiguïté pour lequel il faudrait être plus synthétique et se mettre d'accord pour avoir une segmentation finale. Dans cet exemple, l'accord est obtenu en mettant ensemble le premier et le deuxième segment de la seconde segmentation pour en faire un seul.

Dans l'ensemble de tous les protocoles, une étude de la fiabilité de la segmentation a été faite. Les protocoles ont été évalués en utilisant les approches explicitées ci-dessus. Des accords entre les premières et les secondes segmentations ont été affinés et nous avons obtenu une segmentation finale pour chaque protocole à utiliser pour les codages. Le tableau 4.2 présente les accords entre la première et la seconde segmentation par rapport à la segmentation obtenue après ces études de fiabilité.

	Concept. 1		Concept. 2		Concept. 3		Concept. 4	
Segments finaux obtenus après étude de fiabilité de la segmentation	1125	100%	951	100%	1029	100%	995	100%
Segments finaux en accord avec la 1^{ère} segmentation	855	76%	780	82%	813	79%	856	86%
Segments finaux en accord avec la 2^{ème} segmentation	956	85%	865	91%	916	89%	915	92%

Tableau 4.2 – *Accord des segments des deux opérations de segmentations par rapport aux segmentations finales*

Dans ce tableau, on a, dans les cases blanches, les nombres de segments en accord avec la segmentation finale. Dans les cases grises, on a les pourcentages de ces accords par rapport aux nombres de segments finaux obtenus pour chaque protocole. Ce pourcentage est obtenu en faisant le rapport entre le nombre de segments en accord et le nombre total de segments obtenu de la segmentation finale.

Nous constatons que les pourcentages des accords sont en général élevés pour tous les protocoles. Ils le sont davantage dans la seconde segmentation que dans la première. Ceci serait dû au fait que les secondes opérations de segmentation ont été effectuées après une meilleure fixation des idées sur la méthode, lors de la première opération de segmentation. Cette première opération de segmentation a servi d'apprentissage.

4.2.3.2 Étude de la fiabilité du codage

L'étude de la fiabilité du codage est faite en obtenant un compromis aux anomalies (différences) observées dans les premières et les deuxièmes catégories affectées aux segments. Ces anomalies concernent les segments ambigus qui exigent une considération plus soigneuse. Il peut s'agir aussi d'imperfections dans la définition des codes concernés.

Il convient de noter que les premières opérations de codage ont été faites sur les segments obtenus des premières opérations de segmentation, tandis que les deuxièmes opérations de codage ont été faites sur les segments obtenus des deuxièmes opérations de segmentation. De là, les différences constatées lors de l'étude de la fiabilité de la segmentation ont une incidence sur l'étude de la fiabilité du codage.

Là où il existe une anomalie, les interprétations originales sont reconsidérées et le codeur décide d'un des deux résultats existants ou décide qu'une catégorie différente ou même qu'une autre segmentation est plus appropriée. Ce qui provoque une incidence dans l'étude de la fiabilité de segmentation.

Il y a parfois quelques ambiguïtés entre certains segments qui peuvent être codés de façon différente dans les deux opérations de codage. Nous énumérons ci-dessous trois exemples concrets (exemples concrets 1, 2 et 3) tirés du protocole du concepteur 1.

Exemple concret 1 :

Temps	Segments	1 ^{er} Codage	2 ^{ème} Codage
55'53	Je vais mettre le même diamètre	Ic	Ir

Ce segment sous-entend une dimension de la pièce et est codé lors de la première opération par Ic. Ce segment mène aussi directement au processus d'application de ce diamètre par l'outil CAO et a été codé lors de la seconde opération par un Ir. Le compromis permet d'adopter le premier codage.

Exemple concret 2 :

Temps	Segments	1^{er} Codage	2^{ème} Codage
1h09'25	Pour que ce soit cohérent, je vais faire une coupe circulaire sur le bloc	Ir	Ic

Implicitement, la non-cohérence peut causer des concentrations de contraintes à ce niveau et provoquer une rupture prématurée de la pièce en fonctionnement, ce qui renvoie donc à un Ic. De même, la fin du segment, « ...je vais faire une découpe circulaire sur le bloc », marque en même temps la solution au problème de la cohérence (donc relatif à un Ic) et renvoie directement à l'utilisation d'une fonction de l'outil CAO (donc un Ir). Le compromis permet d'adopter le deuxième codage.

Exemple concret 3 :

Temps	Segments	1^{er} Codage	2^{ème} Codage
20.30	on ne peut pas modifier là ? Euh... Ce qu'ils ont commencé à faire ici puisqu'il faut modifier nettement.	Rr	O

Lors de la première opération de codage, le segment a été catégorisé par un Rr, car des parties du segment font ressortir une réflexion du concepteur. Dans la seconde opération de codage, ce même segment a été catégorisé par O, car des parties du segment font référence à l'observation. Le compromis a été obtenu en divisant le passage en deux segments, l'une correspondant à la catégorie « raisonnement pour la représentation » et l'autre à la catégorie « observation » comme suit :

Temps	Segments	Code
20 :30	on ne peut pas modifier là ? Euh...	Rr
20 :41	Ce qu'ils ont commencé à faire ici puisqu'il faut modifier nettement	O

On observe donc que les compromis obtenus des deux opérations de codage ont une influence sur la segmentation finale. Ainsi, le codage et même la segmentation finale sont obtenus après tous les accords issus des premières et deuxièmes opérations de codage et de segmentation.

De la même façon, pour l'ensemble des quatre expériences, une étude de la fiabilité est faite et un compromis obtenu sur les points de désaccord entre les premières et les deuxièmes opérations de codage. Ceci nous permet d'obtenir un codage final pour chaque protocole. Le tableau 4.3 présente les codes en accords dans les premiers et les seconds codages par rapport aux codages finaux.

	Concepteur 1		Concepteur 2		Concepteur 3		Concepteur 4	
Codes finaux après études de fiabilité	1138	100%	958	100%	1040	100%	1004	100%
Codes finaux en accord avec le 1^{er} codage	785	69%	699	73%	770	74%	673	67%
Codes finaux en accord avec 2^{ème} codage	888	78%	795	83%	832	80%	793	79%

Tableau 4.3 – *Accord des deux opérations de codage par rapport aux codages finaux*

Dans ce tableau, on a dans les cases blanches les nombres de codes en accord avec le codage final. Dans les cases grises, on a les pourcentages de ces accords par rapport aux nombres de codes finaux obtenus de l'étude de fiabilité pour chaque protocole. Ce pourcentage est obtenu en faisant le rapport entre le nombre de codes en accord dans le premier et le deuxième codage et le nombre total de codes obtenus du codage final.

Bien que les pourcentages d'accords des codages obtenus soient plus faibles que ceux de la segmentation (tableau 4.2), nous constatons que ces pourcentages sont en général élevés pour tous les protocoles. Tout comme dans la segmentation, ils le sont davantage dans la seconde opération de codage que dans la première. La première opération de codage a donc aussi servi de phase d'apprentissage.

On constate aussi que les nombres de segments finaux, après l'étude de la fiabilité de codage, sont différents de ceux obtenus après l'étude de la fiabilité de la segmentation. Ceci est dû au fait de l'influence de l'étude de la fiabilité du codage sur celle de la segmentation, comme nous l'avons mentionné ci-dessus. La segmentation finale n'est alors obtenue qu'après l'étude de fiabilité du codage.

4.3 Analyses spécifiques du CTA : activités de conception à l'aide d'outil CAO

Après avoir retranscrit la verbalisation, segmenté le corpus, développé les premières catégories de codage, codé le corpus segmenté et fait l'étude de fiabilité, nous avons effectué dans cette partie les premières analyses.

Il convient de noter que nous avons choisi au préalable une expérience (protocole du concepteur 1) que nous avons analysée. De ces analyses, des hypothèses ont été développées. Ces hypothèses ont été par la suite confirmées par les trois autres expériences avant d'être présentées dans le présent chapitre.

Les critères de choix de l'expérience à analyser en premier se sont portés sur la qualité et le contenu de l'enregistrement audio/vidéo. Concernant la qualité, nous avons choisi le protocole qui permettait la vision de toutes les scènes expérimentales, notamment le contenu de l'écran, l'espace de travail, les croquis, les mouvements et les gestes du concepteur tout au long de la séance expérimentale. La qualité audio dans le protocole choisi permettait aussi de mieux retranscrire la verbalisation. Pour ce qui concerne le contenu, nous avons surtout tenu compte du débit verbal, de la qualité de la verbalisation de la pensée (Think Aloud ou TA), et de la pertinence des solutions proposées.

L'analyse proprement dite du CTA a débuté par la quantification des différentes activités que nous avons pu obtenir des données verbales et visuelles de nos protocoles. Ensuite, le regroupement de ces activités et l'étude des liens entre ces dernières nous permettent de déduire le modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO que nous proposons.

4.3.1 Activités détectées à partir de la verbalisation

L'utilisation des protocoles verbaux retranscrits, segmentés et codés nous permet de recenser les segments correspondants à chaque activité détectée par la verbalisation pour chacune des expériences. Le tableau 4.4 présente, dans sa première partie, le nombre de segments par activité détecté pour chaque protocole. La deuxième partie présente les pourcentages de ces activités par rapport au nombre total de segments verbaux.

Protocoles	O	Ic	Rc	Ir	Rr	Total
Nombres de segments						
Concepteur 1	352	154	110	371	151	1138
Concepteur 2	269	172	136	274	107	958
Concepteur 3	344	165	115	281	135	1040
Concepteur 4	271	167	155	242	169	1004
Pourcentages par rapport au nombre total de segments par protocole						
Concepteur 1	31%	14%	10%	32%	13%	100%
Concepteur 2	28%	18%	14%	29%	11%	100%
Concepteur 3	33%	16%	11%	27%	13%	100%
Concepteur 4	27%	17%	15%	24%	17%	100%

Tableau 4.4 – Segments d'activités détectés par les données verbales

Pour plus de lisibilité, ces mêmes résultats sont présentés en termes de proportion sur les figures 4.3.

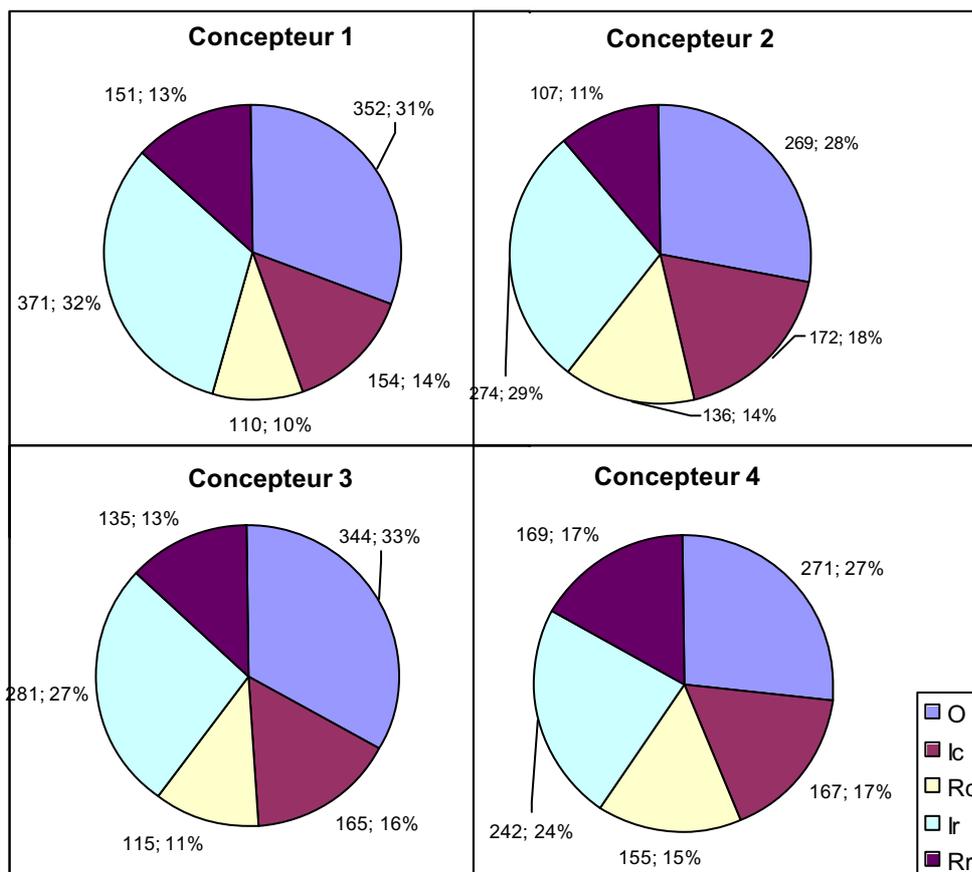


Figure 4.3 – *Proportion des activités détectées par les données verbales dans les quatre protocoles*

Dans les protocoles des concepteurs 3 et 4 (figure 4.3), on remarque que les segments relatifs à l'observation (O) sont majoritaires suivis de ceux relatifs à la formalisation de l'intention de représentation (Ir). Cet ordre est inversé dans les protocoles des concepteurs 1 et 2 où ce sont les segments relatifs à la formalisation de l'intention de représentation (Ir) qui viennent avant ceux de l'observation (O). On note cependant que, dans ce dernier cas (concepteurs 1 et 2), l'écart en pourcentage entre ces deux activités n'est pas grand. D'une façon générale, nous pouvons donc conclure que l'observation a une part importante dans les activités présentes dans tous nos protocoles de conception.

La part importante de la formalisation des intentions de représentation vient déjà prédire l'importance de la manipulation de l'outil dans un processus de conception à l'aide de l'outil CAO.

On note aussi que les raisonnements de conception et pour la représentation (Rc et Rr) ont une faible proportion relative dans les quatre protocoles. Ceci serait dû au fait que toutes ces activités sont détectées à partir de la verbalisation. Or, des chercheurs [ERI 1993 ; CRO 1996] ont déjà montrés que, bien que des instructions fermes soient données aux concepteurs pour verbaliser continuellement toutes leurs pensées, il arrive bien souvent qu'ils

marquent des pauses. Ils ont montré que pendant ces pauses les concepteurs réfléchissent intensément ou effectuent des tâches motrices. La proportion de ces pauses dans chaque protocole en termes de nombre de segments (une pause étant comptabilisée comme un segment) est donnée dans le tableau 4.5.

	Concepteur 1	Concepteur 2	Concepteur 3	Concepteur 4
Verbalisation	79%	74%	75%	77%
Pauses	21%	26%	23%	25%

Tableau 4.5 – *Verbalisation et pauses dans les protocoles*

On constate donc que les pourcentages des pauses, instants où il n'y a pas de verbalisation, ne sont pas négligeables. En nous mettant en accord avec ce qui est décrit dans la bibliographie [ERI 1993 ; CRO 1996], nous pouvons considérer que ces pauses correspondent, soit aux instants où le concepteur réfléchit profondément, soit aux instants où il construit son modèle. Par conséquent, une partie du pourcentage de ces pauses peut être ajoutée au pourcentage des raisonnements. Les proportions réelles des deux types de raisonnement (Rc et Rr) dans le protocole seraient plus grandes que celles détectées par la verbalisation.

En somme, nous notons que chaque activité dans le protocole a une importance non négligeable. Ce qui dénote la pertinence de leur existence dans une séquence de conception à l'aide d'outil CAO.

4.3.2 Activités détectées à partir de la vidéo

Les activités vues à partir de la vidéo ont été aussi détectées à partir de la structuration (segmentation et codage) des données visuelles obtenues. Nous notons que les activités à l'étude ici sont constituées essentiellement des gestes du concepteur vis-à-vis de son modèle du produit (dessin à main levée ou modèle CAO) en construction. Nous avons comptabilisé le nombre de segments des données visuelles dans le protocole et le résultat est donné dans le tableau 4.6.

Protocoles	Construction (Cs)	Navigation (N)	Simple Regard (R)	Total
Concepteur 1	78	74	20	172
Concepteur 2	86	99	18	203
Concepteur 3	94	97	31	222
Concepteur 4	96	88	27	211

Tableau 4.6 – *Nombre de segments d'activités détecté par la vidéo*

La segmentation effectuée sur les données visuelles nous permet seulement de distinguer le passage d'un type de geste à un autre. Comptabiliser le nombre de segments obtenu ne nous a pas paru pertinent. Nous nous sommes intéressés plutôt à la durée de chaque catégorie de données visuelles.

Nous avons ainsi recensé le cumul de temps fait pour chacune de ces activités dans les quatre protocoles et nous les présentons dans le tableau 4.7.

Protocoles	Construction (Cs)	Navigation (N)	Simple Regard (R)	Total
Durée des activités (en secondes)				
Concepteur 1	1392	1530	1824	4796
Concepteur 2	1837	1523	1890	5250
Concepteur 3	2154	2035	1795	5984
Concepteur 4	1752	2090	1808	5650
Proportion des activités				
Concepteur 1	30%	32%	38%	100%
Concepteur 2	35%	29%	36%	100%
Concepteur 3	36%	34%	30%	100%
Concepteur 4	31%	37%	32%	100%

Tableau 4.7 – Durées des activités détectées par la vidéo

La première partie du tableau 4.7 présente les durées des activités détectées par la vidéo dans les quatre protocoles. La deuxième partie du tableau présente les pourcentages des durées de ces activités par rapport à la durée totale pour chaque protocole.

Ces données, pour ce qui concerne les durées, sont reprises et représentées plus explicitement sur la figure 4.4.

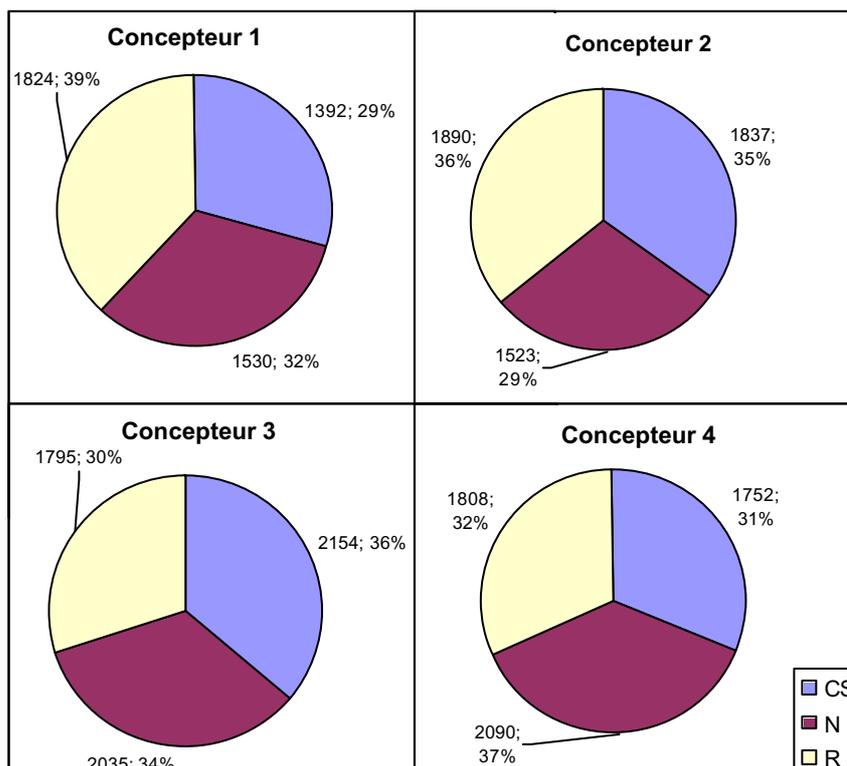


Figure 4.4 – Proportion des activités détectées par les données vidéo des quatre protocoles

Nous constatons que ces activités sont du même ordre de grandeur, ce qui montre la pertinence de l'existence de chacune d'elle dans le protocole.

Ces activités physiques viendront en complément de celles détectées dans la verbalisation pour déterminer les différents éléments de notre modèle d'activité de conception par la CAO.

4.3.3 Activités de la verbalisation et activités de la vidéo mises ensemble

Nous avons recensé le nombre total de segments correspondants aux activités issues de la verbalisation et nous avons établi une correspondance avec les activités issues de la vidéo et vice versa. Ces nombres de segments sont pris conformément à la segmentation intentionnelle de la verbalisation retranscrite.

Nous avons rencontré quelques ambiguïtés dans la mesure où les segments d'activités issues de la verbalisation et ceux des activités issues de la vidéo ne commencent pas et ne se terminent pas toujours au même moment. Il y a des chevauchements.

Les segments d'activités issues de la vidéo durent beaucoup plus longtemps que ceux des activités issues de la verbalisation. De ce fait, un segment d'activités issu de la vidéo correspond à plusieurs segments d'activités issues de la verbalisation et l'ambiguïté est facile

à lever. Il suffit de considérer le segment d'activité verbale qui chevauche et de le comptabiliser dans le segment d'activité visuelle où il est majoritairement inclus. Ainsi, l'erreur faite en opérant ainsi est minimisée dans la mesure où le nombre de segments d'activités verbales obtenues dans les segments d'activités visuelles est largement supérieur à la portion abandonnée (ou ajoutée selon le cas) lors de la comptabilisation des correspondances. Une illustration est faite sur la figure 4.5.

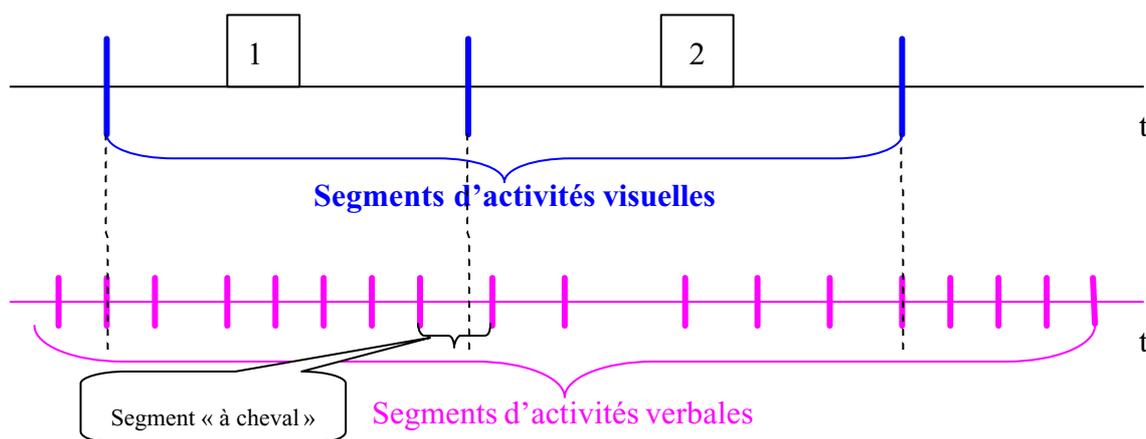


Figure 4.5 – *Correspondance entre les segments d'activités verbales et ceux des activités visuelles*

Sur la figure 4.5, nous comptons 7 et 5 segments de données verbales respectivement dans les segments d'activités visuelles 1 et 2. En effet, le segment d'activité verbale «à cheval» sera comptabilisé dans le segment d'activité visuelle 1 et pas dans le 2.

Une illustration des résultats pour le concepteur 1 est présentée dans le tableau 4.8. Les mêmes résultats pour les autres concepteurs sont présentés en annexe 3. Ils affichent les mêmes tendances que les résultats du concepteur 1 et les interprétations que nous avons faites sont aussi valables pour ces derniers.

Activités	Regard simple (R)	Navigation (N)	Construction (Cs)	TOTAL
1^{ère} partie : correspondance en termes de nombre de segments				
O	162	158	32	352
Ic	46	22	86	154
Rc	32	44	34	110
Ir	67	122	182	371
Rr	55	51	45	151
Pauses	91	88	124	303
TOTAL	453	485	533	1441
2^{ème} partie : correspondance en termes de pourcentage des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation				
O	46%	45%	9%	100%
Ic	30%	14%	56%	100%
Rc	29%	40%	31%	100%
Ir	18%	33%	49%	100%
Rr	36%	34%	30%	100%
Pauses	30%	29%	41%	100%
3^{ème} partie : correspondance en termes de pourcentage des activités issues de la verbalisation dans les activités issues de la vidéo				
Observation	36%	33%	6%	
Ic	10%	5%	16%	
Rc	7%	9%	12%	
Ir	15%	25%	34%	
Rr	12%	10%	9%	
Pauses	20%	18%	23%	
TOTAL	100%	100%	100%	

Tableau 4.8 – *Correspondant des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation et vice versa (concepteur 1)*

La première partie du tableau 4.8 présente les résultats en terme de nombre de segments correspondant à chaque activité issue de la vidéo, dans les activités issues des la verbalisation et vice versa.

La deuxième partie de ce tableau présente les pourcentages du nombre de segments correspondant aux activités issues de la vidéo dans chaque activité issue de la verbalisation. Ce pourcentage est calculé en faisant le rapport entre le nombre de segments de l'activité correspondante issue de la vidéo sur le nombre total de segments de l'activité issue de la verbalisation, dans lesquelles le nombre de segments correspondant à l'activité issue de la

vidéo ci-dessus est comptabilisé. Par exemple, le nombre de segments correspondant au simple regard (R) dans l'observation (O) est 162 (1^{ère} partie du tableau 4.8). Le nombre total de segments catégorisé par O est 352. Le pourcentage des simples regards dans l'observation est donc de 46% (2^{ème} partie du tableau 4.8).

La troisième partie du tableau 4.8 fait la présentation des pourcentages du nombre de segments correspondant aux activités issues de la verbalisation dans chaque activité issue de la vidéo. Ce pourcentage est calculé en faisant le rapport entre le nombre de segments de l'activité correspondante issue de la verbalisation sur le nombre total de segments correspondant à l'activité issue de la vidéo dans lesquelles le nombre de segments correspondant à l'activité issue de la verbalisation ci-dessus est comptabilisé. En reprenant l'exemple du paragraphe précédent, le nombre de segments correspondant à l'observation (O) dans le simple regard (R) est encore de 162 (1^{ère} partie du tableau 4.8) mais le nombre total de segments correspondant au simple regard (R) est 453. Le pourcentage des simples regards dans l'observation est donc de 36 % (3^{ème} partie du tableau 4.8). Ce qui est bien différent du pourcentage de l'observation dans les simples regards.

Notre interprétation de ces représentations est faite en considérant chaque activité issue de la verbalisation et en étudiant sa correspondance avec les activités détectées par la vidéo. Nous en décrivons quelques grandes lignes.

Observation

On note un faible pourcentage des éléments de la construction pendant l'observation. Les 9% des constructions observées dans les observations ne correspondent qu'à 5% de toutes les constructions dans le protocole. Ceci pourrait dénoter une certaine incompatibilité de ces deux types d'activité dans le protocole. En effet, pendant que le concepteur construit son modèle, il est plutôt attentif à l'utilisation des fonctions du système CAO qu'à la capture des informations issues des constructions précédentes. Cette capture est l'activité principale de l'observation. En effet, pendant l'observation, le concepteur est alors plus occupé, d'une part, à capter les informations issues des constructions précédentes afin d'avoir de nouvelles idées de conception ou de représentation et, d'autre part, à évaluer les constructions précédentes pour voir si elles sont conformes aux intentions de conception ou aux intentions de représentation. Pour arriver à cette fin, le concepteur est amené à naviguer dans le système ou à regarder attentivement les représentations de la conception produites jusqu'ici. C'est ce qui explique les parts prédominantes du simple regard (46%) et de la navigation (45%) dans l'observation. Au contraire, l'observation est l'activité majoritaire dans les simples regards et dans les navigations (3^{ème} partie du tableau 4.8).

Formalisation des intentions de conception

On note une prépondérance des constructions (56% ; 2^{ème} partie du tableau 4.8) dans les segments catégorisés par la formalisation des intentions de conception, bien que ne

représentant que les 16% de l'ensemble des constructions dans tout le protocole (3^{ème} partie du tableau 4.8). Cette prépondérance est due à l'application, lors des constructions, de contraintes dimensionnelles et de formes qui sont classées dans le type structurel des intentions de conception comme décrit dans [KUA 2005]. En effet, pendant que le concepteur utilise les fonctions du système CAO pour construire le modèle, il lui est proposé d'appliquer à chaque entité créée des contraintes géométriques et dimensionnelles. Cette prédominance pourrait traduire une certaine efficacité du système CAO, qui fait passer directement de l'intention de conception à sa représentation, sans étape intermédiaire de réflexion pour le choix des fonctions de l'outil CAO pour représenter cette intention.

Formalisation des intentions de représentation

Comme pour les Ic, on note aussi une prépondérance de la construction (49% ; 2^{ème} partie du tableau 4.8). Mais ici, l'effet est bijectif, car ce pourcentage fait de la formalisation de l'intention de représentation l'activité majoritaire dans les instants de construction (41% ; 3^{ème} partie du tableau 4.8). On note aussi une part importante de navigation (33% ; 2^{ème} partie du tableau 4.8), et une faible part de regard passif (18% ; 2^{ème} partie du tableau 4.8). Ceci s'explique par la nature même du système CAO utilisé. La formalisation des intentions de représentation pointe en fait vers les fonctions de l'outil CAO pour construire le modèle ou pour naviguer, afin de mieux se positionner pour construire ou de parfaire dans les détails le modèle CAO.

Raisonnement (de conception et pour la représentation)

Dans les raisonnements, les pourcentages des activités issues de la vidéo semblent être du même ordre de grandeur. Ces proportions dans les raisonnements représentent une part faible de toutes les activités issues de la vidéo dans l'ensemble du protocole (5% environ pour le raisonnement de conception et 8% environ pour le raisonnement pour la représentation). Ceci est dû au fait que les raisonnements détectés dans la verbalisation ont été eux aussi en petits nombres. Cependant, tous les raisonnements n'ont pas été détectés par la verbalisation compte tenu du fait que le concepteur marque des pauses quand il réfléchit intensément [ERI 1993 ; CRO 1996]. Or, la part non négligeable des pauses dans le protocole peut amener à conclure qu'une part importante du raisonnement n'a pas été extraite avec précision du protocole. La part particulièrement élevée des constructions dans les raisonnements pour la représentation serait due au fait que le concepteur réfléchit constamment pendant la construction de son modèle pour le choix de la fonction CAO appropriée.

Pauses

Dans les pauses, nous avons 41% de construction, 30% de navigation et 24% de regard passif. Conformément à la bibliographie [ERI 1993], les 41% de construction dans les pauses s'expliquent par le fait qu'il n'est pas toujours facile de produire une activité motrice en même temps que la verbalisation. De même, dans [CRO 1996], il a été noté dans des études

de protocole que les pauses étaient concentrées dans les constructions (dans leur cas, c'était uniquement les croquis à main levée) et dans les instants où le concepteur réfléchissait intensément.

De ces analyses, nous avons pu détecter des activités à l'aide de la verbalisation et d'autres à l'aide de la vidéo. Nous allons maintenant étudier les liens entre ces différentes activités.

4.4 Résultat : modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO

Un des résultats que nous avons pu tirer des analyses faites est la déduction d'un modèle d'activité de conception à l'aide de l'outil CAO [KUA 2006a]. La méthode de déduction et la description de ce modèle sont présentées dans cette section. Nous allons tout d'abord décrire la base du modèle en déterminant les activités du modèle et en les regroupant en deux parties : une partie pour la conception et une partie pour la représentation. Ensuite, nous allons étudier les liens entre ces activités et finaliser notre modèle d'activité.

4.4.1 Base du modèle : activités du modèle et regroupement par partie

L'étude des activités issues de la verbalisation dans nos protocoles nous a permis d'en faire un classement en catégories. Les proportions considérables des segments codés par chacune d'elle nous ont permis de conclure à la pertinence de leur existence comme activités présentes dans une séquence de conception à l'aide d'un outil CAO. Ces activités sont donc considérées comme des éléments du modèle d'activité que nous avons pour ambition de définir. Il s'agit de :

- **Observation ;**
- **Raisonnement de conception ;**
- **Formalisation de l'intention de conception ;**
- **Raisonnement pour la représentation ;**
- **Formalisation de l'intention de représentation.**

Il existe un sixième élément du modèle qui symbolise la présence des activités qui ont été détectées par la vidéo. Nous l'avons dénommé **Action**.

L'ensemble de ces éléments est regroupé en deux parties distinctes. Une partie conception et une partie représentation. Une illustration est faite sur la figure 4.6.

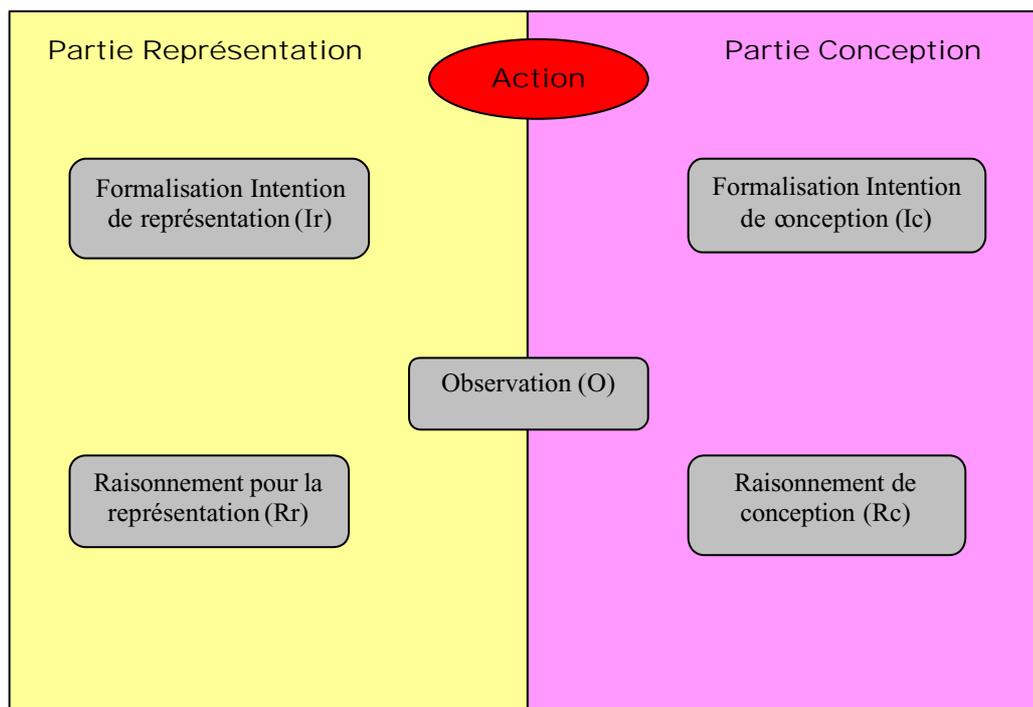


Figure 4.6 – Base du modèle d'activités de conception à l'aide d'outil CAO

Deux des éléments du modèle appartiennent à la fois à ces deux parties. Il s'agit de l'observation et de l'action.

En effet, l'observation peut se faire dans plusieurs buts. On peut observer pour voir l'évolution de la conception et évaluer si elle est conforme à l'intention de conception formalisée. On peut aussi observer pour voir si le modèle construit est conforme à l'intention de représentation formalisée. On peut aussi observer pour apprécier l'évolution de la conception afin d'avoir de nouvelles idées pour la suite. L'observation, dans la partie représentation, se produit quand le concepteur fait une revue ou une évaluation du modèle construit pour vérifier s'il est conforme à l'intention de représentation formalisée.

La partie de l'action qui se trouve en même temps en conception et en représentation concerne notamment le simple regard et la navigation qui mènent à l'observation. De là, la part de la navigation dans la partie conception ou représentation dépend de la nature de l'observation qu'elle implique.

Pour avoir les éléments relatifs à la partie conception et ceux relatifs à la partie représentation, il suffira donc de faire une étude des observations. Nous avons donc distingué l'observation pour la conception (Oc) et l'observation pour la représentation (Or).

Le code d'un segment est transformé de O à Or quand ce segment fait référence au regard porté sur le modèle du produit en construction, afin d'apprécier ou évaluer l'effet d'une représentation.

Ce code est transformé de O à Oc quand le segment fait référence à la capture de l'information :

- dans le problème de conception pour l'examiner ;
- sur le dessin à main levée pour l'examiner ou l'évaluer ;
- sur le modèle CAO en construction pour vérifier si l'entité observée prend bien en compte l'ensemble d'intentions de conception pris en compte lors de sa création ou pour capitaliser ce qui est déjà créé afin de produire de nouvelles idées pour la suite de la conception.

Après cette distinction, et en ne considérant que les activités de la verbalisation, nous avons défini des codes tels que Pc pour l'ensemble des éléments de la partie conception et Pr pour l'ensemble des éléments de la partie représentation. Nous avons alors :

$$Pc = Oc + Ic + Rc \quad \text{et} \quad Pr = Or + Ir + Rr.$$

Le nombre de segments relatifs à chaque partie a été comptabilisé et présenté dans le tableau 4.9.

	Concepteur 1		Concepteur 2		Concepteur 3		Concepteur 4	
Pc	416	37%	410	57%	420	40%	422	42%
Pr	722	63%	548	43%	620	60%	582	58%
Total	1138	100%	958	100%	1040	100%	1004	100%

Tableau 4.9 – Nombre et pourcentage des segments relatifs aux deux parties du modèle

Les nombres et les proportions élevés de segments relatifs à Pr montrent la grande importance des activités liées spécifiquement à la manipulation de l'outil dans le protocole. La connaissance de ces contraintes peut contribuer à penser un modèle ou un outil capable de les minimiser.

On remarque, en outre, que les nombres de segments relatifs à la partie conception sont de même ordre de grandeur pour tous les concepteurs et que les différences notables constatées dans les nombres totaux de segments viennent surtout des éléments de la partie représentation.

4.4.2 Liens entre les différentes activités du modèle

4.4.2.1 Définition et notations

Nous appelons liens entre deux activités X? Y le passage direct dans le protocole d'un segment intentionnel catégorisé par X à un autre catégorisé par Y. Ce qui signifie que le concepteur, lors de son travail, est passé de l'activité X à l'activité Y. Ce lien est distinct du lien Y? X, où le concepteur est passé de l'activité Y à l'activité X. Les deux liens peuvent être abrégés en une seule notation X? Y, quand il s'agira de faire allusion aux deux liens à la

fois. Quand un lien se passe entre une activité et elle même (X? X), nous l'appelons aussi boucle.

4.4.2.2 Quantification des liens dans les protocoles

Nous avons comptabilisé les liens qui apparaissent entre les différentes activités et nous les présentons dans le tableau 4.10 pour chaque protocole.

Liens	Concepteur 1		Concepteur 2		Concepteur 3		Concepteur 4		Moyenne	
O ? O	87	7,7	104	10,9	71	6,8	78	7,9	85,0	8,3
O ? Ic	49	4,3	28	2,9	47	4,5	22	2,2	36,5	3,5
Ic ? O	56	4,9	22	2,3	50	4,8	24	2,4	38,0	3,6
O ? Rc	31	2,7	25	2,6	44	4,2	34	3,4	33,5	3,2
Rc ? O	30	2,6	29	3,0	40	3,9	33	3,3	33,0	3,2
O ? Ir	122	10,8	80	8,4	123	11,8	81	8,1	101,5	9,8
Ir ? O	123	10,8	76	7,9	129	12,4	81	8,1	102,2	9,8
O ? Rr	61	5,4	37	3,9	55	5,3	55	5,5	52,0	5,0
Rr ? O	57	5,0	33	3,5	57	5,5	55	5,5	50,5	4,9
Ic ? Ic	31	2,7	73	7,6	44	4,2	62	6,2	52,5	5,2
Ic ? Rc	41	3,6	49	5,1	45	4,3	46	4,6	45,2	4,4
Rc ? Ic	44	4,0	44	4,6	50	4,8	47	4,7	46,2	4,5
Ic ? Ir	19	1,7	22	2,3	15	1,4	21	2,1	19,2	1,9
Ir ? Ic	26	2,3	23	2,4	20	1,9	29	2,9	25,2	2,4
Ic ? Rr	7	0,6	3	0,3	10	0,1	14	1,4	8,5	0,6
Rr ? Ic	4	0,4	6	0,6	5	0,5	7	0,7	5,5	0,5
Rc ? Rc	25	2,2	47	4,9	11	1,1	41	4,1	31,0	3,0
Rc ? Ir	9	0,8	12	1,3	13	1,3	18	1,8	13,0	1,3
Ir ? Rc	11	1,0	13	1,4	10	1	14	1,4	12,0	1,2
Rc ? Rr	1	0,1	1	0,1	2	0,2	16	1,6	5,0	0,5
Rr ? Rc	2	0,2	4	0,4	4	0,4	19	1,9	7,2	0,7
Ir ? Ir	152	13,4	106	11,1	70	6,4	59	5,9	96,7	9,2
Ir ? Rr	61	5,4	56	5,9	54	5,2	59	5,9	57,5	5,6
Rr ? Ir	67	5,9	54	5,6	58	5,6	63	6,3	58,0	5,8
Rr ? Rr	21	1,9	10	1,0	12	1,2	25	2,5	17,0	1,6
Total	1137	100	957	100	1039	100	1003	100	1034,0	100

= Nombre de liens = pourcentage par rapport au nombre total de liens

Tableau 4.10 – *Quantités et pourcentages des liens par rapport au nombre total de liens possibles dans chaque protocole*

L'avant-dernière colonne a été obtenue en faisant la moyenne des nombres de segments correspondants aux protocoles des quatre concepteurs.

La dernière colonne a été obtenue en faisant la moyenne des pourcentages de segments correspondants aux protocoles des quatre concepteurs.

On remarque que, pour toute activité X et Y, les liens $X? Y$ et $Y? X$ sont généralement du même ordre de grandeur en nombre et donc en pourcentage par rapport au nombre total de liens dans chaque protocole. Ils sont, même dans certains cas, parfaitement identiques (exemple : $O? Ir$ et $O? Rr$ dans le protocole du concepteur 4).

On remarque aussi que le pourcentage du lien $Rr? Rr$ est en général faible dans tous les protocoles. La faible importance relative du lien $Rr? Rr$ peut s'expliquer par la familiarité des concepteurs avec le logiciel de CAO CATIA V5 utilisé dans les expériences, car le concepteur n'est pas souvent revenu sur le même type de raisonnement avant de formaliser ses intentions.

L'activité O est celle qui est le plus en liaison avec les autres. L'importance des liens entre cette activité et toutes les autres est toujours significative.

4.4.2.3 Importance relative des liens entre les activités

Avec l'étude faite en termes de nombres liens et de pourcentages correspondants au nombre total de liens, il n'est pas toujours facile d'avoir une bonne vision de l'importance des liens qu'une activité a avec les autres, dans la mesure où les nombres de segments correspondants sont très variables. Par exemple, le pourcentage de 2,7% du lien $O? Rc$ par rapport au nombre total de liens dans le protocole du concepteur 1 n'est pas indicatif par rapport à l'importance du nombre de liens de ce type avec tous les autres liens possibles avec Rc ou O. Ainsi, nous avons jugé opportun d'évaluer l'importance relative des liens que chaque activité a avec les autres.

Prenons par exemple un protocole d'un nombre total de 1000 segments intentionnels catégorisés par différentes activités, dont les activités X et Y. Supposons que le nombre de segments catégorisés par l'activité X est 10 et celui catégorisé par l'activité Y est 25. Supposons que le nombre de liens $X? Y$ est 6. Par rapport au protocole général, ce lien ne correspond qu'à 0,6% de l'ensemble de tous les liens du protocole, alors qu'en fait il représente 60% du nombre de liens possibles de l'activité X vers toutes les autres activités dans le protocole. C'est ce dernier nombre (60%) que nous appelons importance relative du lien $X? Y$.

4.4.2.3.1 Définition

Soient X et Y deux activités dans un protocole ; $X, Y \in \{O, Ic, Rc, Ir, Rr\}$

Soient n_x et n_y les nombres respectifs de segments relatifs à l'activité X et à l'activité Y et $\text{Min}(n_x, n_y)$ le plus petit nombre entre n_x et n_y ;

Soit $n(X? Y)$ le nombre effectif de liens $X? Y$ dans un protocole ;

Soit $\text{Max}(X? Y)$ le maximum possible de liens $X? Y$ dans un protocole ;

Nous définissons l'importance relative du lien $X \rightarrow Y$, c'est-à-dire l'importance relative du passage direct de l'activité X à l'activité Y , par la formule :

$$I_{XY} \% = \frac{n(X \rightarrow Y)}{\text{Max}(X \rightarrow Y)} \times 100$$

Il est facile de constater que $\text{Max}(X \rightarrow Y) = \text{Min}(n_x, n_y)$. Si on a par exemple 3 segments d'activité X et 4 segments d'activité Y , les configurations possibles qui donnent le maximum de lien $X \rightarrow Y$ sont : $Y \dots XY \dots XY \dots XY$, $XY \dots Y \dots XY \dots XY$, $XY \dots XY \dots Y \dots XY$ et $XY \dots XY \dots XY \dots Y$. Dans cet exemple, on voit bien que $\text{Max}(X \rightarrow Y) = \text{Min}(3, 4) = 3$. La formule de l'importance des liens de l'activité X vers l'activité Y peut encore s'écrire :

$$I_{XY} \% = \frac{n(X \rightarrow Y)}{\text{Min}(n_x, n_y)} \times 100$$

Il ressort de cette formule que $I_{XY} \% \neq I_{YX} \%$. En effet, le tableau 4.10 nous montre que $n(X \rightarrow Y) \neq n(Y \rightarrow X)$ et il est évident que $\text{Min}(n_x, n_y) = \text{Min}(n_y, n_x)$.

4.4.2.3.2 Présentation de l'importance relative des liens dans les protocoles

Pour nos quatre protocoles, les importances relatives sont calculées et représentées dans le tableau 4.11.

Liens	I_{XY} % du Concepteur 1	I_{XY} % du Concepteur 2	I_{XY} % du Concepteur 3	I_{XY} % du Concepteur 4	I_{XY} % Moyenne
O ? O	24,7	38,7	20,6	28,8	28,2
O ? Ic	31,8	16,3	28,5	13,2	22,5
Ic ? O	36,4	12,4	30,3	14,4	23,4
O ? Rc	28,1	18,4	38,3	21,9	26,7
Rc ? O	27,3	21,3	34,8	21,3	26,2
O ? Ir	34,7	29,7	43,8	33,5	35,4
Ir ? O	34,9	28,3	45,9	33,5	35,7
O ? Rr	41,7	34,6	40,7	32,5	37,4
Rr ? O	36,4	30,8	42,2	32,5	35,5
Ic ? Ic	20,1	42,4	26,7	37,1	31,6
Ic ? Rc	37,3	36,0	39,1	29,7	35,5
Rc ? Ic	40,0	32,4	43,5	30,3	36,6
Ic ? Ir	12,3	12,8	9,1	12,6	11,7
Ir ? Ic	16,9	13,4	12,1	17,4	14,9
Ic ? Rr	4,6	2,8	7,4	8,4	5,8
Rr ? Ic	2,7	3,6	3,7	4,2	4,1
Rc ? Rc	22,7	34,6	9,6	26,5	23,4
Rc ? Ir	8,2	8,8	11,3	11,6	10,0
Ir ? Rc	10,0	9,6	8,7	9,0	9,3
Rc ? Rr	0,9	0,9	1,7	10,3	3,4
Rr ? Rc	1,8	3,7	3,5	12,3	5,3
Ir ? Ir	41,0	38,7	24,9	24,4	32,2
Ir ? Rr	40,4	52,3	40,0	39,9	43,1
Rr ? Ir	44,4	50,5	43,0	37,3	43,8
Rr ? Rr	13,9	9,4	8,9	14,8	11,8

Tableau 4.11 – Importance relative des liens dans les protocoles

La dernière colonne du tableau 4.11 présente la moyenne correspondant à chaque lien issu des quatre protocoles.

On remarque que, dans tous les protocoles, les nombres de liens (tableau 4.10) X? Y et Y? X et leur importance relative (tableau 4.11) présentent les mêmes tendances. La plus grande différence constatée en importance relative entre les deux types de lien est de 4,8% pour Ir? Ic dans le protocole du concepteur 1. On remarque aussi qu'elles sont parfaitement identiques pour O? Ir et O? R dans le protocole de concepteur 4.

Pour avoir une meilleure vision de l'importance relative des liens entre les activités détectées dans le protocole, nous avons effectué pour chaque protocole un histogramme de ces liens que nous présentons sur les figures 4.7 à 4.10. La figure 4.11 présente l'historgramme synthèse des quatre premiers. Il est obtenu à partir des données présentées dans la dernière colonne (« moyenne ») du tableau 4.11.

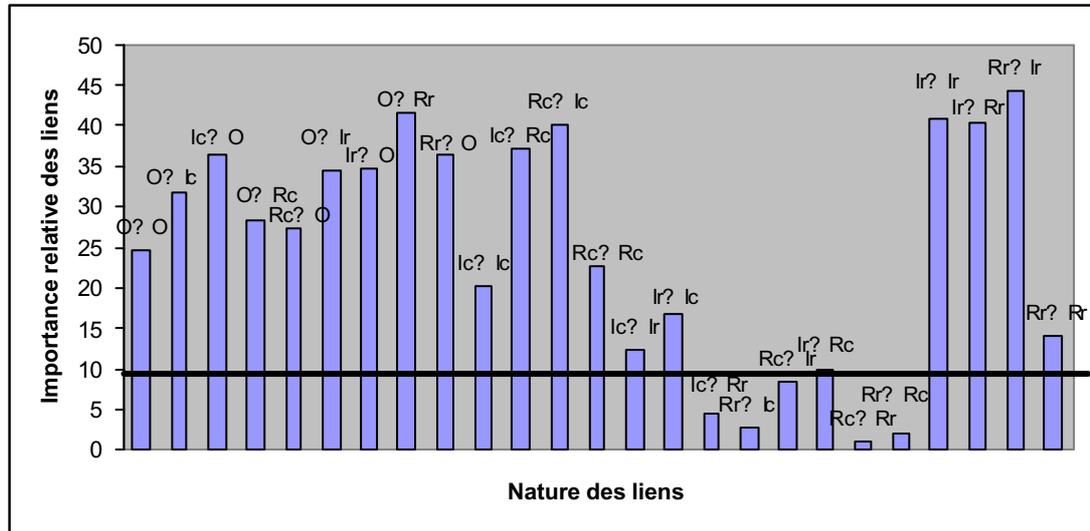


Figure 4.7 – *Histogramme de l'importance relative des liens dans le protocole du concepteur 1*

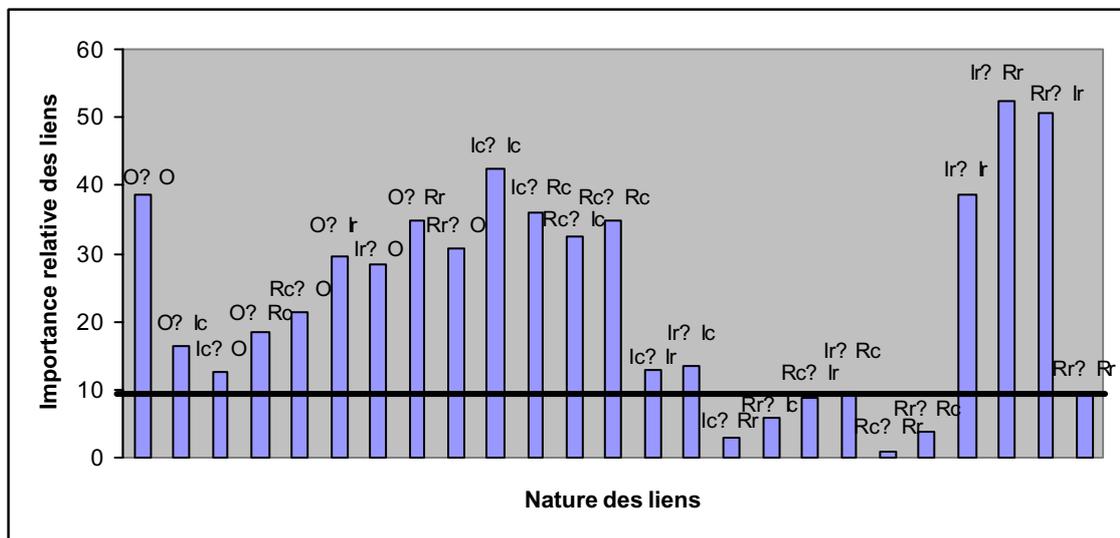


Figure 4.8 – *Histogramme de l'importance relative des liens dans le protocole du concepteur 2*

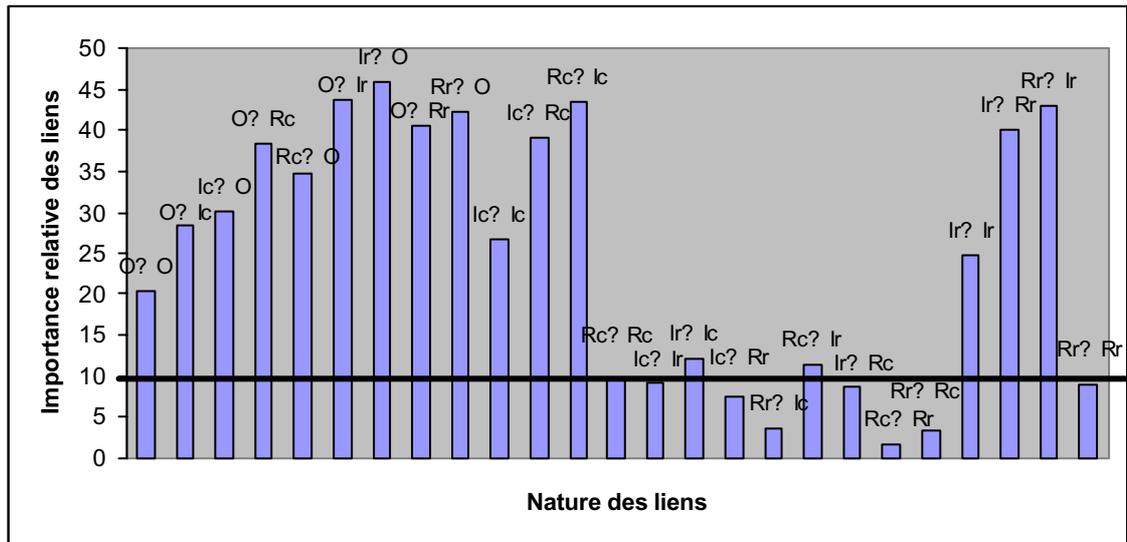


Figure 4.9 – Histogramme de l'importance relative des liens dans le protocole du concepteur 3

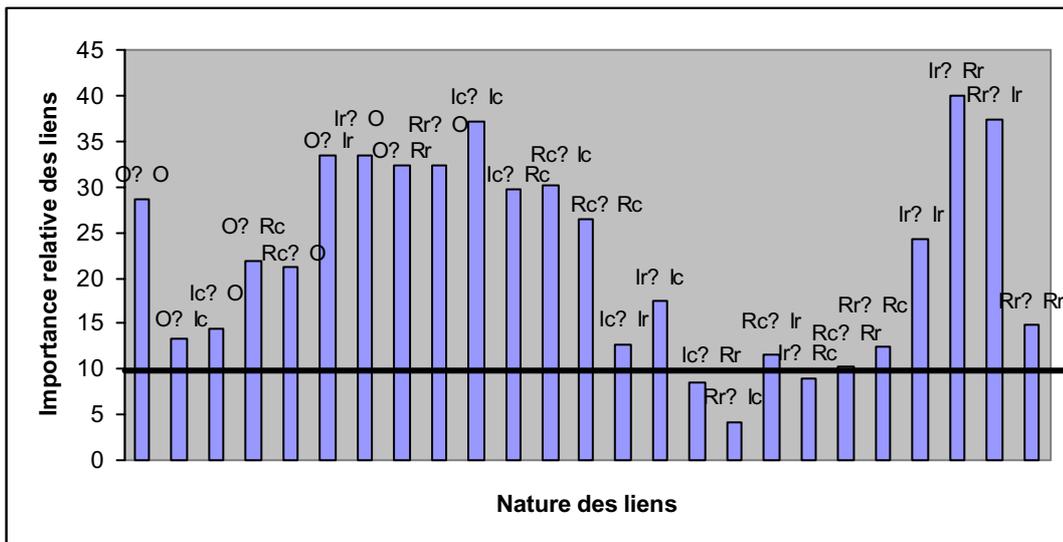


Figure 4.10 – Histogramme de l'importance relative des liens dans le protocole du concepteur 4

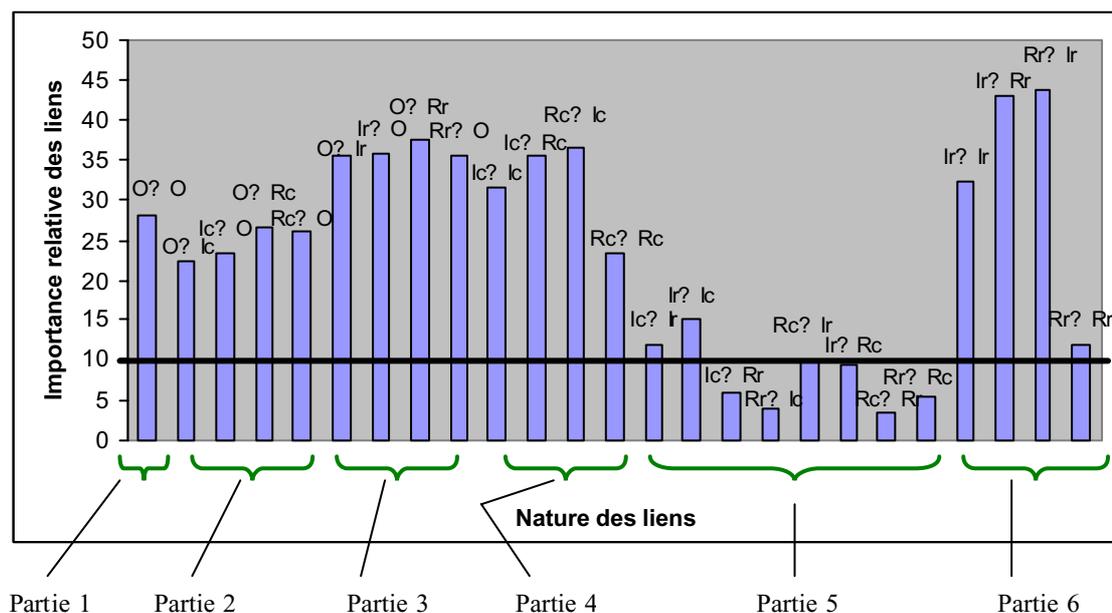


Figure 4.11 – Histogramme de l'importance relative des liens dans les quatre protocoles

Une vue de cet ensemble d'histogrammes montre que ces derniers présentent tous six parties distinctes (figure 4.11) :

- Partie 1 : composée d'un seul élément. Le passage de O à lui même (lien O? O).
- Partie 2 : composée de 4 éléments. Le passage de O vers les éléments de la partie conception et vice versa (O? Ic, Ic? O, O? Rc, Rc? O).
- Partie 3 : composée de 4 éléments. Le passage de O vers les éléments de la partie représentation et vice versa (O? Ir, Ir? O, O? Rr, Rr? O).
- Partie 4 : composée de 4 éléments. Le passage des éléments de la partie conception vers les éléments de la partie conception (Ic? Ic, Ic? Rc, Rc? Ic, Rc? Rc).
- Partie 5 : composée de 8 éléments. Le passage des éléments de la partie conception vers les éléments de la partie représentation et vice versa (Ic? Ir, Ir? Ic, Ic? Rr, Rr? Ic, Rc? Ir, Ir? Rc, Rc? Rr, Rr? Rc).
- Partie 6 : composée de 4 éléments. Le passage des éléments de la partie représentation vers les éléments de la partie représentation (Ir? Ir, Ir? Rr, Rr? Ir, Rr? Rr).

On remarque que l'importance relative des liens de O vers les éléments de la partie conception, et vice versa, (partie 2) est en général plus faible que celle de O vers les éléments de la partie représentation et vice versa (partie 3), bien que les deux types de liens aient une importance relative élevée. De même, l'importance relative des liens entre les éléments de la partie conception (partie 4) est en général plus faible que celle entre les éléments de la partie représentation (partie 6).

On note aussi que l'importance relative de l'élément de la partie 1 est en moyenne élevée. Il en est de même pour ce qui est des parties 2, 3, 4 et 6. En revanche, l'importance relative des éléments de la partie 5 (passage d'un élément de la partie conception vers un élément de la partie représentation et vice versa) est toujours faible.

Toutes ces remarques nous amènent à penser que, lors de la conception, les boucles entre les activités effectuées par le concepteur se font le plus souvent entre les éléments d'une même partie (entre les éléments de la partie représentation ou entre les éléments de la partie conception). Le passage d'une partie à une autre se fait le plus souvent par l'observation qui appartient aux deux parties. Pour mieux illustrer cela, nous allons finaliser notre modèle d'activité en faisant une schématisation du modèle de l'activité de conception pour chaque protocole, et en tenant compte des histogrammes des figures 4.7 à 4.10.

4.4.3 Finalisation du modèle de conception à l'aide d'outils CAO

Les histogrammes des figures 4.7 à 4.11 sont utilisés pour finaliser notre modèle d'activité de conception à l'aide d'un outil CAO.

Nous procédons comme suit :

- Les liens d'activités dont l'importance relative est inférieure à 10% (voir lignes de filtre sur les figures 4.7 à 4.11) ont été supprimés.
- Pour les autres liens, les épaisseurs des traits qui les représentent sont fonction de leurs importances relatives. Par exemple, à l'échelle 1 de notre document, nous présentons dans le tableau 4.12 le barème que nous avons utilisé pour établir la correspondance entre l'importance relative des liens et l'épaisseur des traits qui les représente.

Importance relative (%)	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40 et +
Largeur des traits (en pts)	0	1/4	3/4	1 1/2	2 1/4	3	4 1/2	6

Tableau 4.12 – Barème de représentation des liens entre les activités

En adoptant cette règle, nous présentons sur les figures 4.12 à 4.15 les modèles d'activités de conception finalisés pour chacun des protocoles. La figure 4.16 présente le modèle d'activité de conception synthèse des quatre précédents. Chacune de ces représentations sera suivie d'une interprétation sommaire.

4.4.3.1 Modèle d'activités de conception issu des quatre protocoles

Les figures 4.12 à 4.15 présentent les modèles d'activités de conception issues des quatre protocoles. Les liens entre les éléments sont issus de l'histogramme des figures 4.7 à 4.10 en adoptant le barème du tableau 4.12.

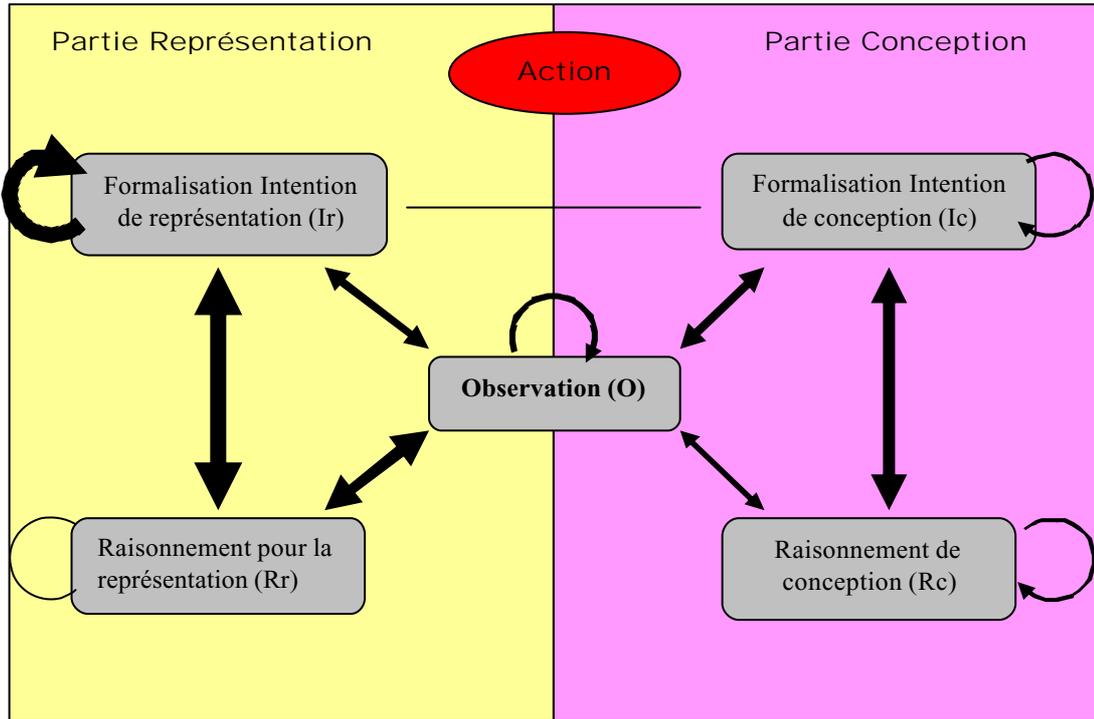


Figure 4.12 – *Modèle d'activité de conception issu du protocole du concepteur 1*

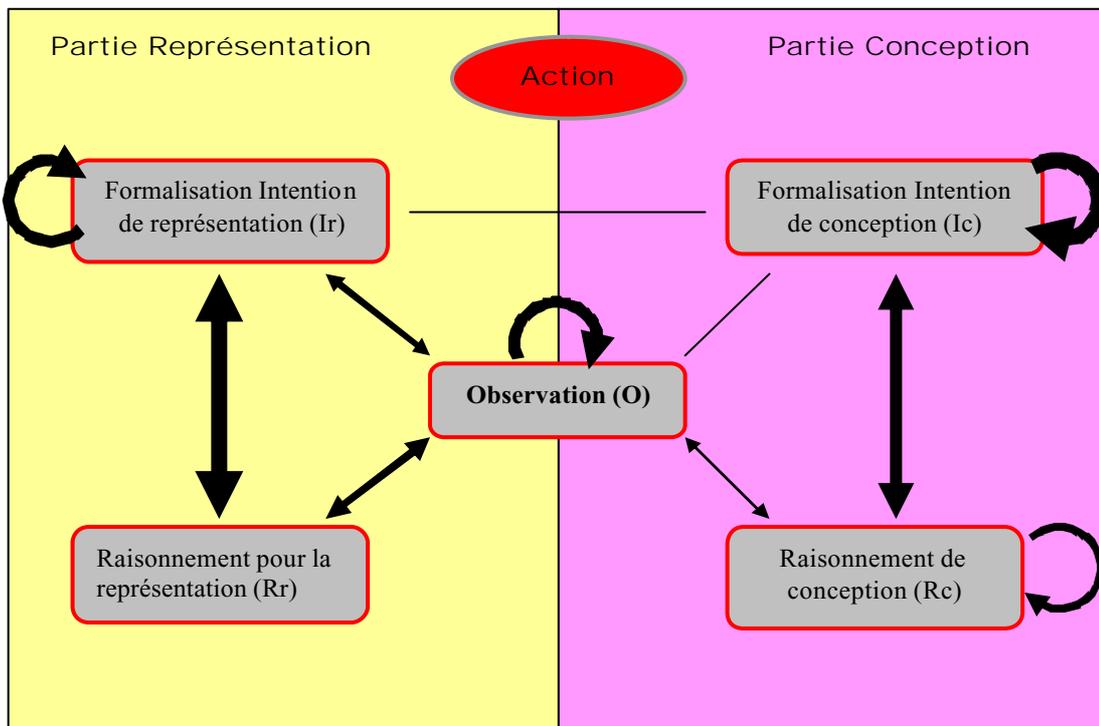


Figure 4.13 – *Modèle d'activité de conception issu du protocole du concepteur 2*

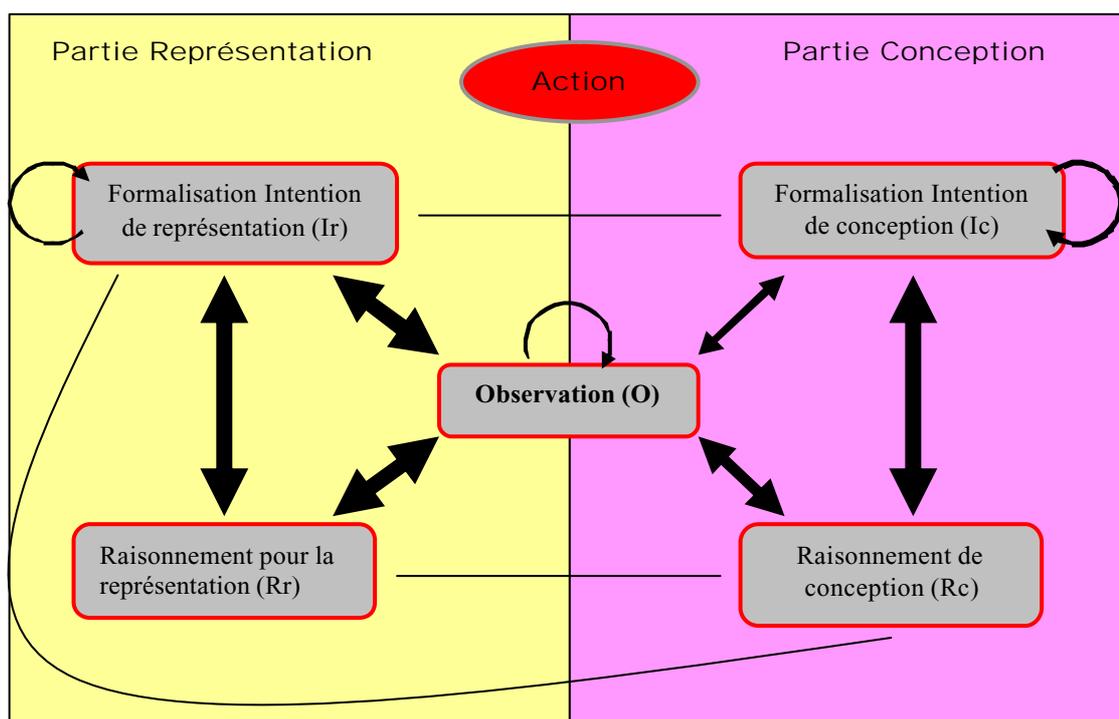


Figure 4.14 – *Modèle d'activité de conception issu du protocole du concepteur 3*

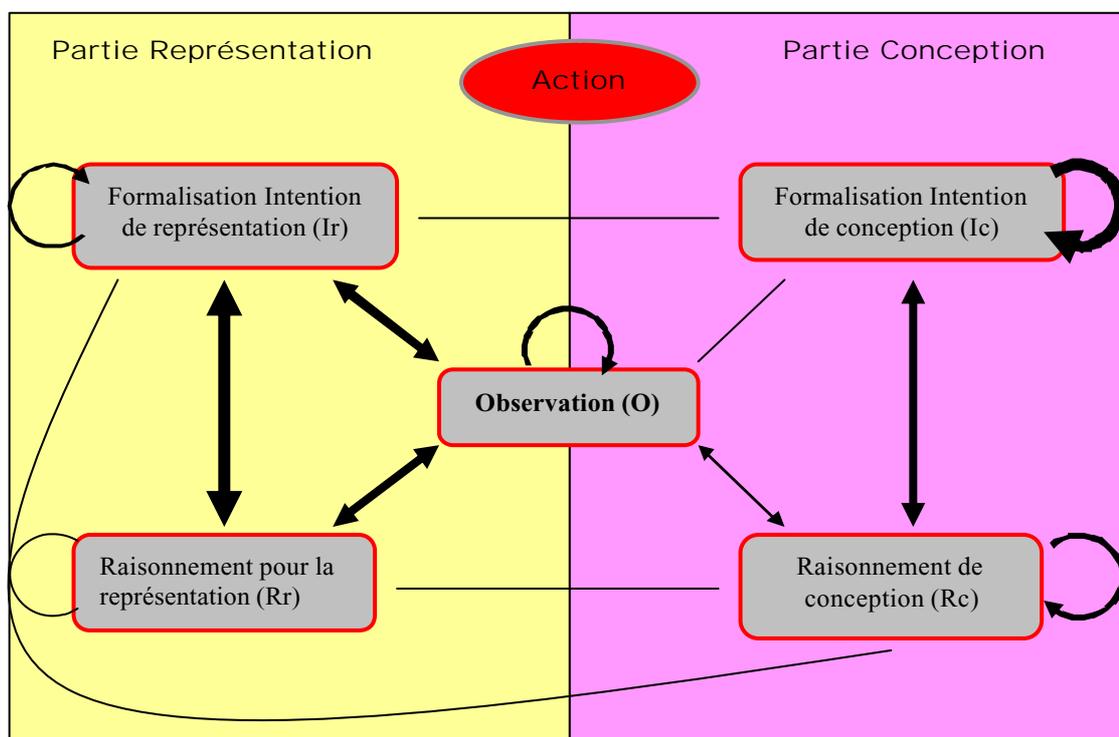


Figure 4.15 – *Modèle d'activité de conception issu du protocole du concepteur 4*

De ces modèles d'activité de conception, nous faisons les observations suivantes.

Pour les quatre concepteurs :

- L’observation est l’activité de conception qui a une importance des liens significative à double sens avec toutes les autres activités.
- Les liens à l’intérieur d’une même partie du modèle sont plus importants que ceux entre les parties. Ils apparaissent plus importants dans la partie représentation que dans la partie conception.
- À l’exception du lien Ir? Ic pour le concepteur 3, du lien Rc? Ic pour les concepteurs 3 et 4, et du lien à double sens Ir? Ic pour les concepteurs 1, 2 et 4, le passage de la partie conception à la partie représentation et vice versa se fait par l’observation qui appartient aux deux parties. Le passage entre ces deux parties par les liens entre les activités Ir et Ic pourrait s’expliquer par la présence de certains types de segments dont l’interprétation du contenu renvoie à la fois à un type d’intention de conception et à l’utilisation directe de l’outil CAO. Par exemple, quand on fait une extrusion, l’outil demande automatiquement de lui donner certaines dimensions comme dans l’exemple suivant :

Je vais faire une extrusion circulaire	Ir
Je vais maintenant lui donner une longueur de 30mm	Ic
Je vais centrer le tout par rapport à l’axe de l’autre trou	Ir

On part donc de l’intention de représentation (Ir) qui est d’utiliser la fonction « extrusion » de l’outil CAO à l’application des contraintes dimensionnelles qui relèvent beaucoup plus d’une intention de conception (Ic). Après coup, on revient à l’intention de représentation qui amène à manipuler l’outil CAO pour centrer le tout et continuer la construction du modèle CAO.

De façon plus spécifique et parfois isolée, nous avons remarqué que :

- Les liens Ir? Rr et Ir? Ir sont les plus importants dans le modèle d’activité issu du protocole du concepteur 1.
- Dans les modèles d’activité issus des protocoles des concepteurs 1 et 4, tous les éléments ont une importance relative de liens avec eux-mêmes (boucles) non négligeable.
- Le modèle d’activité de conception issu du protocole du concepteur 2 a la même allure que celui du concepteur 1 pour ce qui concerne les liens entre les éléments différents. Mais l’importance relative de l’observation avec les autres éléments semble plus faible.
- Dans le modèle d’activité du concepteur 2, la boucle O? O est plus importante que dans les modèles d’activité des autres protocoles et est de même grandeur que la boucle Ir? Ir. L’importance relative de la boucle Ic? Ic est la plus grande et la boucle Rr? Rr est inexistante tout comme dans le modèle d’activité issu du protocole du concepteur 3.

- Dans les modèles d'activité issus des protocoles des concepteurs 3 et 4, les passages d'une partie du modèle à une autre, sans passer par l'observation, ne se font plus seulement par les liens entre Ir et Ic, contrairement au modèle d'activité issu des protocoles des concepteurs 1 et 2. On a aussi les liens de passage Ir? Ic, Rr? Rc et Rc? Ir. Cependant, bien que significatifs, ces liens gardent une importance relativement plus faible que celle des autres liens présents dans le modèle.
- Les boucles Rr? Rr et Rc? Rc sont inexistantes dans le modèle d'activité issu du protocole du concepteur 3. Ceci peut provenir du fait que le concepteur 3 n'a pas eu plusieurs fois les mêmes raisonnements avant de formaliser ses intentions.

4.4.3.2 Modèle d'activité de conception synthèse

Le modèle d'activité de conception de la synthèse des quatre protocoles est obtenu en faisant pour chaque lien la moyenne des importances relatives obtenues des quatre protocoles. Ce modèle-synthèse est présenté sur la figure 4.16. Les liens entre les éléments sont issus de l'histogramme de la figure 4.11 en adoptant le barème du tableau 4.12.

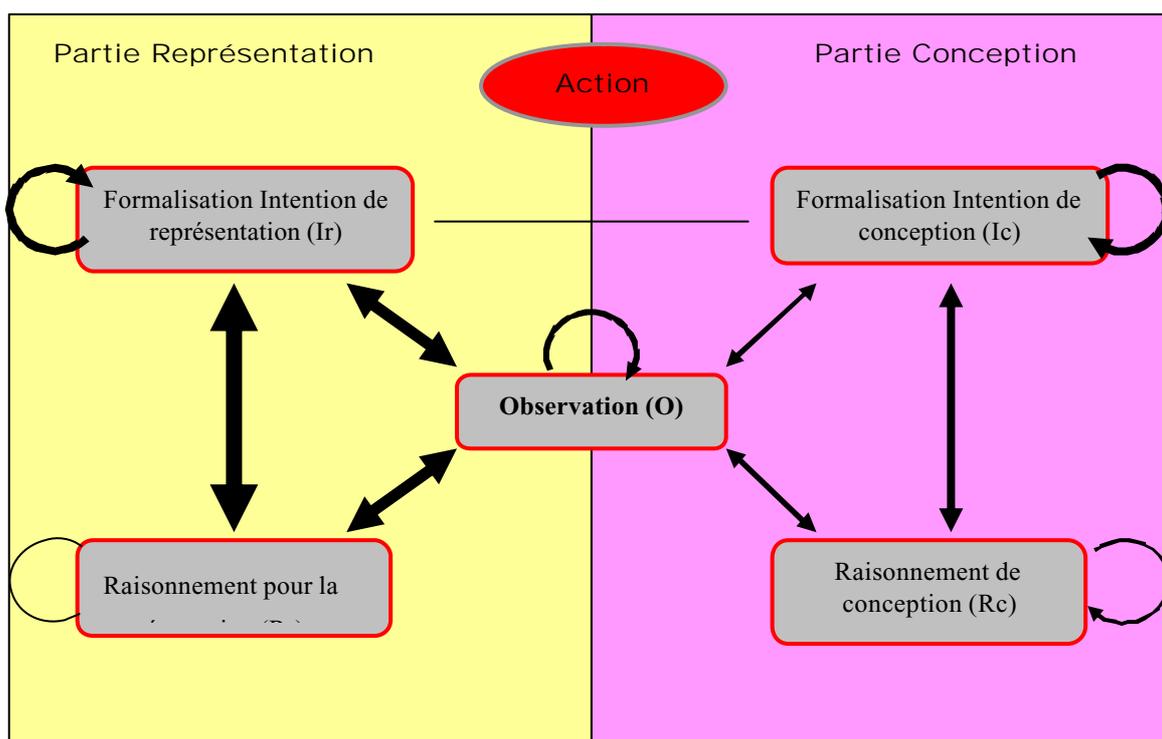


Figure 4.16 – *Modèle d'activité de conception – synthèse des quatre*

On remarque que :

- Toutes les boucles sur les activités existent, même si elles sont de grandeurs différentes.

- Les importances relatives de I_r ? I_r et I_c ? I_c sont de même ordre de grandeur et sont les plus grandes, suivies de celle de O ? O puis celle de R_c ? R_c , et enfin celle de R_r ? R_r qui est faible. Cette faiblesse tend à montrer que les concepteurs n'ont pas beaucoup réfléchi successivement par rapport à l'outil CAO de représentation et peut correspondre à une certaine maîtrise de cet outil.
- Les liens entre les éléments d'une même partie sont significatifs (I_r ? R_r ? O et I_c ? R_c ? O). Cependant, les liens qui sont entièrement dans la partie représentation entre deux éléments différents sont importants par rapport à ceux dans la partie conception entre deux éléments différents.
- le seul lien (I_c ? I_r) qui permet le passage de la partie conception à la partie représentation et vice versa, autrement que par l'observation, a une importance relative faible. Ce qui nous amène à conclure que pour passer de la partie conception à la partie représentation, le concepteur passe le plus souvent par l'observation.

Le modèle d'activité de conception issu de nos expériences nous montre dans sa partie conception qu'il existe des éléments capables de nous aider à construire les modules d'historique de conception et de raisonnement de conception. Le module d'historique de conception pourra se construire en introduisant chronologiquement les intentions de conception formalisées. Le module de raisonnement sera obtenu en introduisant les raisonnements subséquents. De plus, une meilleure organisation de ces données enrichira le module d'inférence, qui pourra alors restituer par exemple toute intention et tout raisonnement développés lors de la construction de chaque entité, tout simplement en se pointant sur l'entité en question et en faisant appel à l'option correspondant à la restitution des intentions de conception.

4.4.3.3 Interprétation spécifique de quelques liens

Une étude de notre modèle nous amène aux hypothèses suivantes concernant certains liens spécifiques :

- O ? I_r : observation pour évaluer et voir si la représentation faite est conforme à l'intention de représentation.
- O ? R_c : alternance d'observation et de raisonnement pour avoir de nouvelles idées de conception.
- O ? R_r : alternance d'observation et de raisonnement pour le choix des fonctions de l'outil CAO pour la représentation.
- O ? I_c : observation pour évaluer et voir si l'intention de conception formalisée a été bien prise en compte par la représentation.
- R_c ? I_c : formalisation en pensée de l'intention de conception issue d'un raisonnement de conception (R_c ? I_c) et évaluation de l'intention de conception

formalisée par rapport au raisonnement précédent ($I_c? R_c$). Aussi, le TA n'étant pas parfait, bien des fois, le lien ($I_c? R_c$) peut survenir du fait de la verbalisation sociale du concepteur, quand il a déjà réfléchi sans verbaliser, formaliser son intention avant d'expliquer sa réflexion pour justifier son choix.

- $R_r? I_r$: formalisation en pensée de l'intention de représentation issue d'un raisonnement pour la représentation ($R_r? I_r$) et évaluation de l'intention de représentation formalisée par rapport au raisonnement précédent ($I_r? R_r$).
- $I_c? R_r$: après avoir formalisé en pensée l'intention de conception, ce passage indique le mouvement du concepteur vers sa représentation. Il doit alors réfléchir par rapport à l'outil pour choisir les fonctions adéquates, pour extérioriser ses pensées grâce à la représentation.
- $I_c? I_r$: ce lien tend à démontrer l'efficacité de l'outil CAO pour la représentation de la conception, car on passe directement de l'intention de conception formalisée à sa représentation. Ceci concerne notamment l'application des contraintes dimensionnelles ou la traduction de certaines formes qui sont classées dans le type structurel d'intention de conception. D'une façon plus générale, certains éléments liés à la définition de la structure physique du produit se confondent à une fonction de l'outil et renvoient directement à l'utilisation de ces fonctions pour la représentation.

4.5 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre repose essentiellement sur des observations expérimentales. Des quatre expériences que nous avons montées et qui sont présentées au troisième chapitre de cette thèse, des critères objectifs nous ont permis de choisir celle qui devait servir de base pour développer nos hypothèses. Ces hypothèses sont ensuite validées par les trois autres expériences.

Pour l'analyse des expériences, nous avons utilisé une méthode de segmentation issue de la bibliographie et nous avons développé nos propres catégories de codage selon l'objectif de notre travail. Ces catégories de codage sont constituées des différentes activités que nous avons observées dans le protocole. Elles ont été distinctement appliquées à la verbalisation et à la vidéo. Les catégories de codage appliquées à la verbalisation sont constituées en substance des différentes pensées du concepteur, alors que celles appliquées à la vidéo sont essentiellement liées à ses gestes.

L'étude de l'importance de chaque activité et des liens entre elles nous a permis de proposer notre modèle d'activité de conception à l'aide de l'outil CAO. Dans ce modèle, une explication des liens entre ces différents éléments a été donnée. Une étude quantitative des

différents éléments du modèle dans le protocole a été faite, dans le but de confirmer la pertinence de leur existence dans un tel processus.

Les liens étudiés se sont faits entre les activités détectées par la verbalisation. Pour ce qui concerne les activités détectées par la vidéo, une correspondance a été faite avec les activités détectées à l'aide de la verbalisation. Ces activités détectées à l'aide de la vidéo ont été regroupées sous le terme « action » et présentées dans notre modèle d'activité.

Le regroupement des activités du modèle en deux parties nous a permis de constater l'importance de la partie représentation. Cette importance pourrait montrer la portée des contraintes liées à la manipulation de l'outil CAO pour produire la conception.

De plus, la partie conception du modèle présente deux éléments représentatifs des modules d'historique et de raisonnement de conception. Mais, ce constat ne résout pas le problème de savoir si ces modules sont intégrés dans le système CAO utilisé ou non. La comparaison entre le CTA et le RTA, que nous présenterons au chapitre 5, permet de répondre à cette question. Nous y développerons également un cadre qui pourrait permettre d'attacher l'ensemble des intentions de conception dans un modèle CAO.

Chapitre 5

Comparaison entre CTA et RTA et définition d'un cadre pour attacher l'intention de conception au modèle CAO du produit

5.1 Introduction

Ce chapitre a deux objectifs principaux :

- Compléter l'analyse d'une séquence de conception à l'aide d'outil CAO, commencée au chapitre 4. Ce complément d'analyse permettra de questionner d'éventuelles insuffisances des outils CAO actuels dans la représentation des intentions de conception, notamment en ce qui concerne les modules d'historique et de raisonnement de conception.
- Développer un cadre qui permettra d'attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. Ainsi, les modules d'historique et de raisonnement de conception pourront être améliorés et ajoutés au système CAO actuel, ou développés à côté de ces derniers de façon complémentaire. Ceci aura pour but, d'une part, de permettre l'amélioration de la conception à l'aide d'outils CAO et d'autre part, de permettre de penser à l'amélioration des outils actuels ou à la conception de nouveaux outils pour la représentation plus complète des intentions de conception, au regard des caractéristiques du système idéal que nous avons présenté dans le premier chapitre.

Une avancée dans l'atteinte de ces objectifs revient à fournir des réponses aux trois questions suivantes :

1. Les modèles CAO actuels permettent-ils de capturer toutes les intentions de conception prises en compte lors de leur création ?
2. Si oui, peuvent-ils entièrement les restituer longtemps après la conception avec l'aide de ce seul modèle du produit ?
3. Si non, comment améliorer la conception à l'aide d'outils CAO pour permettre une représentation idéale des intentions de conception ?

Le chapitre comprendra deux parties. La première effectuera la comparaison entre la verbalisation concurrente de la pensée (CTA) et la verbalisation rétrospective de la pensée (RTA). La seconde définira le cadre pour attacher les intentions de conception au modèle CAO.

Pour la première partie, nous commencerons par décrire la procédure que nous avons utilisée, qui est une amélioration du plan d'exécution classique du *protocol analysis*, avec l'introduction simultanée du CTA et du RTA dans le même schéma. Ensuite, nous présenterons la comparaison en introduisant, au préalable à chaque analyse, une restructuration des données à cet effet. Cette restructuration permettra de définir de nouvelles catégories ou des sous-catégories de celles existantes sur lesquelles se baseront les

comparaisons. Ces comparaisons pourront nous permettre de répondre aux deux premières questions ci-dessus.

Les réponses aux deux premières questions nous conduisent logiquement à la troisième question. La seconde partie de ce chapitre a pour but d'apporter notre contribution à en trouver une réponse. Nous commencerons par déduire des analyses précédentes le but de la définition du cadre pour attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. La section qui suivra montrera comment nous proposons d'introduire les intentions de conception lors de la construction du modèle CAO du produit. Ces données introduites pourront servir à la construction des modules d'historique et de raisonnement de conception. Nous donnerons ensuite une proposition de structuration des données introduites et dans la dernière section, nous proposerons une façon de récupérer les intentions de conception introduites et structurées dans le système. La structuration des données se veut une amélioration du module des moteurs d'inférence déjà présent dans les systèmes CAO : la façon de récupérer les intentions de conception est un mode de fonctionnement de ce module.

5.2 Comparaison entre le CTA et le RTA

5.2.1 Procédure de déroulement

La comparaison entre le CTA et le RTA a été faite tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif.

Notre travail a été réalisé en trois temps. Nous avons commencé par le déroulement du CTA. Nous avons ensuite laissé s'écouler une heure environ et nous avons fait appel au même concepteur pour expliquer sa solution lors du protocole du RTA, en utilisant seulement le modèle CAO construit dans la première phase comme stimulus de rappel des pensées. Dans un troisième temps, nous avons fait une comparaison des deux types de protocoles en terme de qualité et de quantité de segments intentionnels obtenus.

Pour introduire ces trois temps, nous avons modifié le plan classique d'exécution du *protocol analysis* que nous avons présenté dans le deuxième chapitre à la figure 2.4. Le nouveau plan que nous avons obtenu et qui intègre le CTA et le RTA ensemble est présenté sur la figure 5.1.

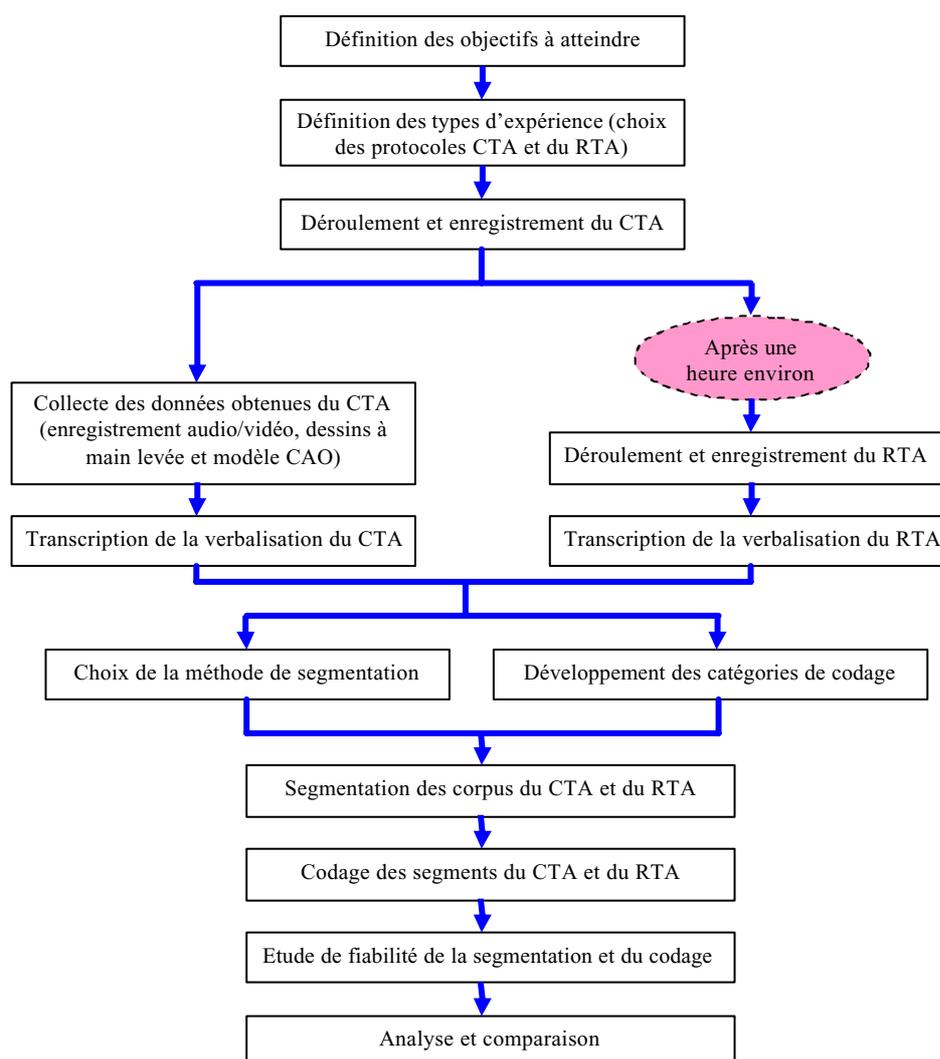


Figure 5.1 – Plan d'exécution pour nos études de comparaison

Presque toutes ces étapes mentionnées sur la figure 5.1 ont été abordées dans les chapitres précédents. Pour effectuer nos comparaisons, les études déjà faites seront prises en compte.

En complément, pour approfondir nos analyses afin de mieux effectuer la comparaison entre les données issues du CTA et du RTA, les structures projetées sur ces dernières ont été affinées, notamment au niveau du codage, où de nouvelles catégories et sous-catégories ont été développées. Nous les introduirons quand les analyses porteront sur elles.

5.2.2 Filtrage des données

Pour avoir une bonne vision qualitative des résultats, nous avons effectué au préalable des filtrages pour retenir uniquement les éléments utiles sur lesquels seront basées nos comparaisons. Ce filtrage s'est effectué à deux niveaux et concerne les segments verbaux.

5.2.2.1 Premier niveau de filtrage

Au premier niveau, comme nous avons pour objectif d'étudier la capacité des modèles CAO à représenter les intentions de conception, il s'agissait de retenir exclusivement les éléments de la partie conception pour nos études. Ce premier filtre a permis d'éliminer du protocole tous les segments relatifs à la partie représentation, c'est-à-dire à la manipulation de l'outil CAO.

Ainsi, nous avons utilisé les codes Pc et Pr qui ont été affectés aux segments à la section 4.4.1 et dont nous rappelons ici leurs définitions.

Les segments codés par Pc sont ceux correspondants au raisonnement de conception, à la formalisation des intentions de conception et à l'observation dans la partie conception.

De même, les segments codés par Pr sont ceux correspondants au raisonnement pour la représentation, à la formalisation des intentions de représentation et l'observation dans la partie représentation.

Nous avons complété le tableau 4.10 du chapitre 4 par les segments codés par Pc et Pr comptabilisés dans les protocoles du RTA. Le résultat est présenté dans le tableau 5.1.

	Concepteur 1		Concepteur 2		Concepteur 3		Concepteur 4	
Pc	416	104	410	97	420	101	422	89
Pr	722	8	548	19	620	21	582	7
Total	1138	112	958	116	1040	122	1004	96

= CTA
 =RTA

Tableau 5.1. – *Nombre de segments relatifs à la partie conception et à la partie représentation*

La comparaison que nous avons pour objectif de faire se porte sur les intentions de conception, plus spécifiquement sur les éléments de la partie conception (segments codés par Pc). C'est d'ailleurs pour cette raison que dans les RTA il n'a pas été demandé de verbaliser les intentions de représentation. D'où la faiblesse des Pr dans le RTA.

5.2.2.2 Second niveau de filtrage

Au second niveau de filtrage, nous avons étudié l'indépendance des segments retenus après l'application du premier filtre.

Deux segments sont dits dépendants quand ils véhiculent la même intention et indépendants dans le cas contraire.

Nous avons quantifié les nombres de segments indépendants dans les protocoles de chaque concepteur. Aux segments préalablement codés par Pc, nous avons défini d'autres catégories de codage en nous référant aux travaux entrepris par [SUW 1998]. Ainsi, quand un segment véhiculait une intention pour la première fois, nous l'avons codé par NOUVEAU. Quand il reprenait une intention déjà apparue dans le protocole nous l'avons codé par ANCIEN. Le résultat obtenu est présenté dans le tableau 5.2.

	Concepteur 1		Concepteur 2		Concepteur 3		Concepteur 4	
NOUVEAU	312	102	301	96	317	97	306	88
ANCIEN	114	2	109	1	103	4	116	1
TOTAL	416	104	410	97	420	101	422	89

□ = CTA □ = RTA

Tableau 5.2. – *Indépendance des segments dans les protocoles*

Pour éviter les biais qui peuvent survenir du fait qu'une même intention peut être véhiculée par plusieurs segments à des endroits différents du protocole, les segments codés par ANCIEN (troisième ligne du tableau 5.2) ont été éliminés, car les intentions qu'ils véhiculent ont été déjà comptabilisées. Les analyses dans tout ce qui suit se porteront donc uniquement sur les segments indépendants, c'est-à-dire ceux qui sont codés à ce niveau par NOUVEAU (deuxième ligne du tableau 5.2).

5.2.3 Comparaison par rapport au nombre total de segments issus de la verbalisation

Les nombres de segments filtrés de la partie conception, pour les deux types de protocoles, sont extraits du tableau 5.2 et présentés dans le tableau 5.3 pour plus de lisibilité. En complément, nous avons ajouté une colonne correspondant à la durée de chaque protocole.

Acteurs	Protocoles	Segments filtrés	Durée (en min.)
Concepteur 1	CTA	312	80
	RTA	102	11
Concepteur 2	CTA	301	120
	RTA	96	11
Concepteur 3	CTA	317	128
	RTA	97	10
Concepteur 4	CTA	306	112
	RTA	88	11

Tableau 5.3. – *Nombres totaux de segments filtrés dans les protocoles du CTA et du RTA*

Dans la troisième colonne de ce tableau, nous avons les nombres de segments obtenus après les deux opérations de filtrage présentées dans la section précédente.

Les résultats correspondants aux deuxième et troisième colonnes sont représentés sur la figure 5.2.

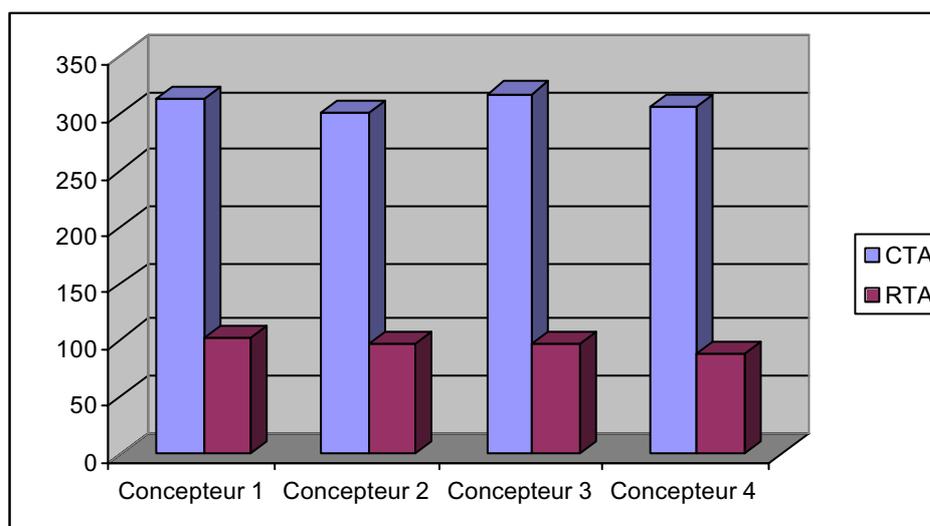


Figure 5.2 – *Segments intentionnels filtrés dans les protocoles*

On remarque que les nombres de segments totaux issus du CTA sont largement supérieurs à ceux issus du RTA pour les quatre concepteurs. Ceci semble logique dans la mesure où le CTA a duré tout au long du travail de conception (c'est-à-dire 80, 120, 128 et 112 minutes respectivement pour les concepteurs 1, 2, 3 et 4), alors que le RTA, qui est venu après la conception, n'a duré que 11 minutes pour les concepteurs 1, 2 et 4 et 10 minutes pour le concepteur 3. Cependant, le CTA est dominé par des segments intentionnels relatifs à la partie représentation, c'est à dire à la manipulation de l'outil CAO, alors que le RTA ce

concentre sur les éléments de la partie conception (voir tableau 5.1). En effet, les éléments de la conception représentent 93%, 84%, 83% et 93% respectivement pour les concepteurs 1, 2, 3 et 4 dans le RTA et n'est que de 37%, 43%, 40% et 42% respectivement pour les concepteurs 1, 2, 3 et 4 dans le CTA. Bien qu'on ait demandé aux concepteurs de verbaliser toutes les intentions qu'ils ont eues pendant leur travail en se servant du modèle CAO du produit lors du RTA, il est clair qu'ils n'ont pas pu le faire parfaitement.

5.2.4 Comparaison par rapport aux domaines de travail

Il nous est paru intéressant d'étudier les proportions de segments filtrés présentés dans la section précédente par domaine de travail. Ainsi, un deuxième niveau de définition des catégories de codage des données visuelles a été fait, dans le but d'effectuer une étude plus fine sur la répartition des segments intentionnels dans les protocoles du CTA et du RTA.

Nous distinguons trois domaines de travail : problème de conception, dessin à main levée et modèles CAO auxquels nous avons affecté les codes respectifs P, D et CAO (voir tableau 4.3, chapitre 4).

La partie concernant le modèle CAO a été ensuite découpée en éléments du produit, identifiés par des chiffres correspondant aux différentes pièces du modèle réalisé par le concepteur. Une illustration concernant le concepteur 1 est présentée sur la figure 5.3. La même illustration pour les autres concepteurs est présentée en annexe 4.

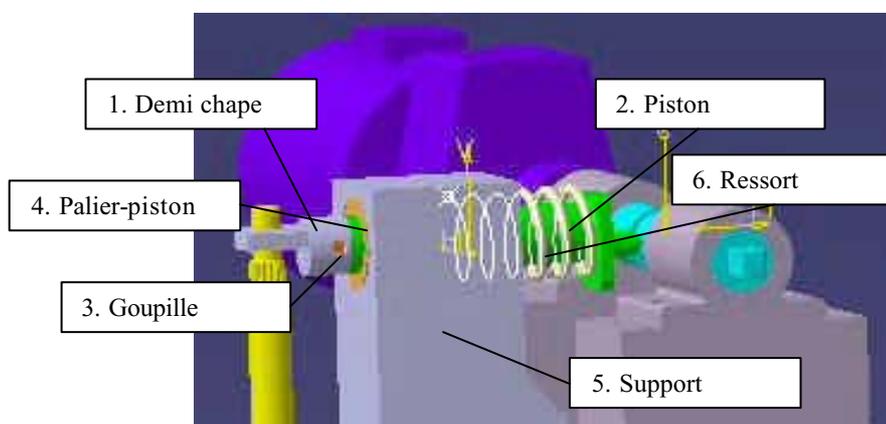


Figure 5.3 – Pièces du modèle CAO du sous-système conçu par le concepteur 1

Nous avons comptabilisé les différentes activités de la partie conception par domaine de travail. Les résultats, en termes de nombre de segments d'activités pour chaque type de protocole et pour chaque concepteur, sont présentés dans le tableau 5.4.

Les interprétations que nous ferons ici et dans tout ce qui va suivre seront basées sur les résultats du concepteur 1 que nous présentons dans le corps de la thèse. Ces interprétations sont ensuite rapprochées et confirmées par les résultats des autres concepteurs.

Acteurs	Protocoles	P	D	CAO							Total
				1	2	3	4	5	6	Mcao	
Concepteur 1	CTA	46	39	44	74	12	18	44	21	14	312
	RTA	4	1	21	35	5	6	14	5	11	102
Concepteur 2	CTA	45	42	41	30	32	39	30		42	301
	RTA	4	2	22	13	13	14	15		13	96
Concepteur 3	CTA	48	41	157	48					23	317
	RTA	3	2	56	16					20	97
Concepteur 4	CTA	36	43	95	2	75	48			7	306
	RTA	3	3	41	1	19	17			4	88

Tableau 5.4. – Nombre de segments d'éléments de conception filtrés par domaine de travail dans le CTA et dans le RTA des quatre concepteurs

Les segments codés par Mcao sont ceux dans lesquels l'intention faisait référence au modèle CAO en entier.

Ces mêmes résultats en termes de pourcentage sont donnés sur la figure 5.4 pour le concepteur 1 et en annexe 5 pour les autres concepteurs.

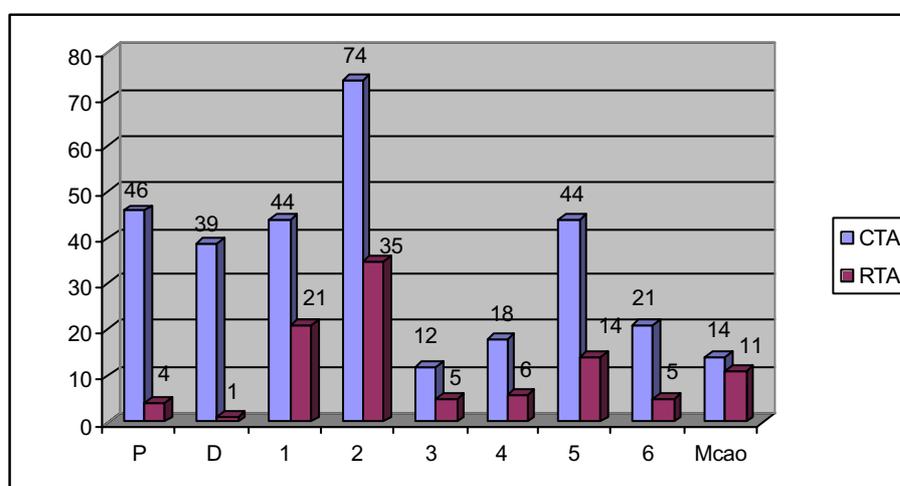


Figure 5.4 – Segments filtrés par domaine de travail dans les protocoles du CTA et du RTA du concepteur 1

Ces résultats montrent que, dans chaque domaine de travail, le nombre de segments intentionnels du CTA est supérieur à celui du RTA. La figure 5.4 montre ensuite que les segments intentionnels filtrés sont majoritaires dans la pièce 2 (74 segments pour le CTA et 35 segments pour le RTA) suivi de la pièce 1 (44 segments pour le CTA et 21 segments pour le RTA). En revanche, les segments intentionnels filtrés sont très peu représentés dans le

problème de conception (P) et le dessin à main levée (D) pour ce qui concerne le RTA. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'on ait demandé au concepteur d'utiliser le modèle CAO du produit lors de la rétrospection pour expliquer ses intentions.

5.2.5 Comparaison par rapport aux types d'éléments de la partie conception

Nous avons poursuivi l'analyse qualitative que nous avons commencée par les deux opérations de filtrage. Ici, nous voulons étudier la répartition par types d'éléments de la partie conception dans les protocoles du CTA et du RTA. Pour y parvenir, nous avons défini des sous-catégories de la catégorie Pc (partie conception) qui correspondent à la nature de chaque élément de la partie conception observée dans le protocole [KUA 2005 ; KUA 2006b]. Ces sous-catégories sont liées aux connaissances métiers prises en compte lors de l'expérience et peuvent être rapprochées des concepts de module présentés dans [SAL 1995 et BRI 1998]. Ces derniers ont développé un modèle de conception distribuée centré sur trois modules (fonctionnel, structurel et fabrication) tout en soulignant l'existence d'autres modules comme l'esthétique, le confort, la maintenance, etc.

Ainsi, nous avons relevé que les segments intentionnels de la partie conception étaient relatifs aux catégories suivantes : fonctionnelle (Fo), structure (St), dimension (Di), fabrication (Fa), maintenance (Ma), Résistance (Re), Esthétique (Et), Matériau (Mt). Leur définition est donnée dans le tableau 5.5.

Code	Catégorie	Description
Fo	Fonctionnelle	Liée aux différentes fonctions à remplir par le produit
St	Structure	Liée à la structure physique du produit (formes et topologie)
Di	Dimension	Liée aux contraintes dimensionnelles (paramètres) affectées au produit
Fa	Fabrication	Liée au mode de fabrication (usinage, fonderie)
Ma	Maintenance	Liée à l'entretien, au montage et au démontage
Re	Résistance	Liée à la résistance de la structure
Et	Esthétique	Liée à l'esthétique du produit
Mt	Matériau	Liée au choix du matériau d'un composant

Tableau 5.5. – *Définition des types d'intentions de conception*

Les segments initialement codés par Pc ont été catégorisés plus finement par ces codes du tableau 5.5. Ils ont été ensuite comptabilisés et les résultats pour les concepteurs sont présentés dans le tableau 5.6 et plus explicitement sur l'histogramme de la figure 5.5 en ce qui

concerne le concepteur 1. Ce même résultat, pour les autres concepteurs, est présenté en annexe 6.

Acteurs	Protocoles	Fo	St	Di	Ma	Fa	Re	Mt	Et	Total
Concepteur 1	CTA	51	102	136	6	10	5	0	2	312
	RTA	21	54	6	11	8	0	1	1	102
Concepteur 2	CTA	51	106	120	9	6	3	3	3	301
	RTA	23	42	13	8	6	2	1	1	96
Concepteur 3	CTA	44	114	123	10	16	10	0	0	317
	RTA	24	44	15	4	7	3	0	0	97
Concepteur 4	CTA	46	104	122	12	13	3	0	6	306
	RTA	19	44	11	4	3	3	0	4	88

Tableau 5.6. – Segments intentionnels par type d'éléments de conception dans le CTA et le RTA des quatre concepteurs

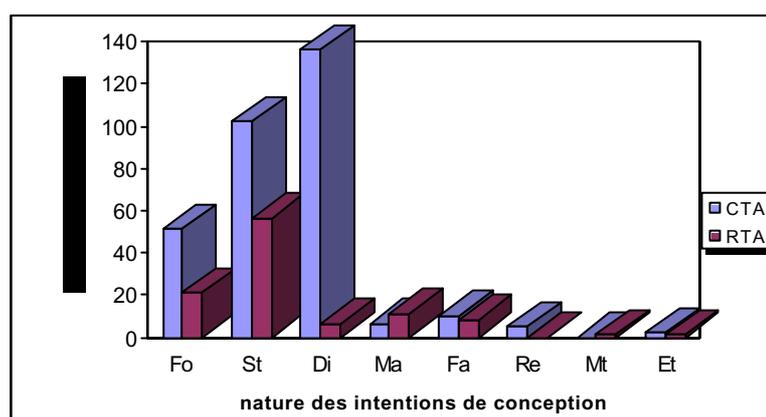


Figure 5.5 – Histogramme de comparaison du CTA et du RTA en terme de qualité des intentions de conception dans les protocoles du concepteur 1

Les interprétations que nous faisons par la suite reposent sur les résultats issus des protocoles du concepteur 1. Elles ont été par la suite rapprochées et validées par les résultats issus des protocoles des autres concepteurs, les résultats obtenus ayant pour l'essentiel les mêmes tendances.

Ainsi, nous constatons que les nombres de segments intentionnels par type dans le CTA sont en général plus grands que ceux du RTA pour les types d'éléments de conception. Le cas de la maintenance (Ma – 6 pour le CTA et 11 pour le RTA) et du matériau (Mt – 0 pour le CTA et 1 pour le RTA) ont des nombres de segments négligeables par rapport au nombre de segments total. De plus, cette tendance est infirmée par les résultats obtenus des protocoles des autres concepteurs, où les segments intentionnels de types maintenance (Ma) et matériau (Mt) sont bien plus grands dans le CTA que dans le RTA.

La présence plus importante d'éléments Ma dans le RTA que dans le CTA du concepteur 1 est due en bonne partie à la verbalisation dans le RTA qui concerne le montage et le démontage de la colonne de direction dans la machine d'essai. Cette partie n'a pas été abordée dans le CTA. D'ailleurs, le concepteur n'y a pas fait allusion dans le RTA que parce que l'expérimentateur le lui a demandé explicitement. On a eu au total 11 segments intentionnels Ma dans le RTA dont 6 segments qui correspondaient au montage et au démontage de la colonne de direction dans la machine d'essai et 5 segments pour le reste du protocole. Dans les protocoles des autres concepteurs, le nombre de Ma est bien plus grand dans le CTA que dans le RTA.

Pour ce qui est du choix du matériau (Mt), son absence dans le CTA du concepteur 1 s'expliquerait par le fait que le concepteur n'a pas abordé l'application du matériau à son modèle CAO lors de son travail. Or, la procédure du CTA demande au concepteur de ne verbaliser que ce qu'il a pensé pendant son travail, alors qu'en RTA, il peut expliquer et justifier les pensées qu'il a eues ou aurait pues avoir lors de son travail. Il cherche alors à se faire comprendre. Pour des raisons de communication sociale, il peut introduire des intentions qu'il n'a effectivement pas eues dans son travail [MAA 2003].

5.2.6 Comparaison par rapport aux types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail

Nous avons pensé à faire une comparaison plus fine pour voir comment sont répartis les types d'éléments filtrés par domaine de travail. À cet effet, nous présentons, dans le tableau 5.7, les résultats obtenus concernant la nature des éléments de la partie conception (Pc) dans chaque domaine de travail pour le concepteur 1 et pour les deux types de protocole. Les mêmes résultats sont présentés en annexe 7 pour les autres concepteurs.

	P		D		CAO														Total	
					1		2		3		4		5		6		Mcao			
Fo	14	1	18	1	2	5	2	9	0	0	1	2	1	1	0	2	13	0	51	21
St	28	3	21	0	7	10	20	19	4	4	1	3	15	10	7	3	1	2	102	54
Di	0	0	0	0	29	4	45	2	6	0	15	0	28	0	13	0	0	0	136	6
Ma	1	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	0	0	0	1	0	0	8	6	11
Fa	1	0	0	0	5	2	3	2	0	0	0	0	1	3	0	0	0	1	10	8
Re	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0
Mt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Et	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
Total	46	4	39	1	44	21	74	35	12	5	18	6	44	14	21	5	14	11	312	102

= CTA
 = RTA

Tableau 5.7. – Segments intentionnels par types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail du concepteur 1

Nous notons que dans le problème de conception (P) et dans le dessin à main levée (D), le nombre de segments intentionnels du CTA est supérieur à celui du RTA. Cette tendance est beaucoup plus nuancée dans les pièces des modèles CAO où on a par exemple l'impression que les intentions de conception de type fonctionnel apparaissent plus dans le RTA que dans le CTA. Mais en réalité, ceci est dû au fait de leur verbalisation dans les domaines P et D et dont certaines, qui sont reprises lors de la construction des pièces CAO, sont supprimées quand nous avons effectué le deuxième filtrage. Par ailleurs, pour certaines de ces intentions de conception verbalisée dans P et D lors du CTA, elles ont été implicitement prises en compte lors de la construction du modèle CAO. Le résultat du cumul de tous les types d'intentions de conception dans chaque domaine de travail est plus grand dans le CTA que dans le RTA.

Cette répartition nous montre aussi que, dans le RTA, le concepteur ne porte pas la même attention à toutes les pièces du modèle dans leur description. Pour celles sur lesquelles le concepteur s'attarde, il produit des explications et des intentions qu'il n'a pas eues pendant son travail et peut même modifier certaines pensées qu'il a eues pour les mêmes raisons de présentation ou de désirabilité sociale.

La pauvreté des intentions dans P et D lors du RTA, pose le problème de leur non restitution par le modèle CAO. Il serait intéressant d'étudier la façon dont elles sont réparties

et prises en compte lors de la construction des modèles CAO, puisque la restitution lors du RTA semble n'avoir pas été efficace à ce sujet.

5.2.7 Insuffisance des outils CAO actuels dans la représentation des intentions de conception

Notre méthode de segmentation et le second niveau du filtrage que nous avons fait pour retenir uniquement les segments indépendants dans nos analyses nous permettent d'affirmer qu'un segment retenu représente une seule intention indépendante et que chaque intention indépendante est interprétée dans un segment. Ainsi, il nous apparaît plausible de penser que tous les segments du CTA ne peuvent pas être condensés et synthétisés dans les segments du RTA.

Avec la prépondérance des nombres de segments filtrés dans le CTA, nous pouvons donc conclure que ce dernier révèle plus d'intentions de conception que le RTA effectué uniquement avec le modèle CAO comme stimulus.

En effet, alors que le CTA fait ressortir toutes les intentions (tant implicites qu'explicites), le RTA ne donne que les intentions explicites. Nous appelons intentions explicites, celles qui sont généralement décrites dans le cahier des charges ou apparaissent explicitement sur le modèle CAO du produit. Quant aux intentions implicites, ce sont celles prises en compte au cours de la conception, détectées par la verbalisation lors du CTA et qui n'apparaissent pas explicitement à la lecture du modèle CAO.

En outre, le RTA, tel que nous l'avons monté, ne peut pas permettre de suivre avec exactitude la qualité et l'évolution des activités de conception déployées dans le processus dans l'ordre exact de leur apparition lors du travail de conception. Toutes choses qui sont possibles avec l'utilisation du CTA.

Notre expérience rétrospective avait pour but de vérifier si le modèle CAO actuel du produit pouvait permettre de recouvrer toutes les intentions qui avaient été prises en compte lors de sa création. La différence que nous avons constatée entre les segments intentionnels en CTA et RTA nous montre clairement que ce n'est pas encore le cas. Ceci nous amène à penser que les modules d'historique et de raisonnement de conception sont peu ou pas développés dans les systèmes CAO actuels.

Dans le but de produire un système d'intentions de conception complet sur la base des systèmes CAO existants, nous avons donc été amenés à penser un cadre, qui pourrait contribuer à définir un outil ou un mode de travail qui permettrait au concepteur d'entrer toutes ses intentions dans le modèle CAO, de façon à ce qu'elles soient facilement restituées au besoin à ses utilisateurs. Ce cadre est présenté dans la partie suivante de ce chapitre.

5.3 Cadre pour attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit

La prise en compte et la restitution de toutes les intentions de conception utilisées lors de la création d'un modèle CAO est indispensable pour de nombreuses raisons, parmi lesquelles : la réutilisation, la prise en main de la suite de la conception, la compréhension de la conception par un autre concepteur du même domaine ou d'un autre domaine travaillant sur le même projet, etc. Des études [MAR 1993 ; LAS 1997 ; LAS 1998] ont été faites dans le but d'améliorer les systèmes CAO à cette fin. Mais, il reste encore du travail à faire. En effet nous venons de montrer que les modèles CAO actuels ne permettent pas encore d'atteindre adéquatement ces objectifs. Les informations au sujet de la construction du modèle CAO pour représenter le produit sont généralement non explicitées. Ces informations peuvent être vues comme le résultat d'une série de décisions, qui est une étape dans la transformation des spécifications initiales en forme générale du produit. Chaque décision repose sur des informations, des hypothèses, des estimations et des évaluations développées dans le processus de conception. Elle a un impact sur le produit final et les spécifications industrielles. Le modèle CAO doit donc être conçu en capitalisant toutes les raisons des décisions prises lors de sa construction, de manière à ce qu'elles soient facilement accessibles au besoin. Ces informations introduites et enregistrées chronologiquement constitueront le module d'historique de conception. De plus, il apparaît important d'enregistrer le raisonnement derrière les décisions affectant l'évolution de ces informations. Ces enregistrements constitueront le module de raisonnement de conception. Enfin, toutes les informations et les raisonnements pendant le développement du modèle doivent être structurés de façon à être restitués au besoin sur simple demande. Ceci se fera par le module du moteur d'inférence développé ou amélioré par la structuration des données introduites.

Ainsi, nous présentons dans cette partie un cadre qui permettrait d'attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. Nous commencerons par proposer une démarche qui permettra au besoin leur introduction lors de la création des modèles CAO. Ensuite nous présenterons la structure que nous proposons pour leur organisation dans le système, de sorte qu'elles puissent être restituées efficacement au besoin. Nous présenterons enfin la façon dont cette restitution peut être effectuée.

5.3.1 Introduction des intentions de conception dans le modèle CAO du produit

La comparaison entre le CTA et le RTA que nous avons effectuée nous permet d'affirmer qu'il serait souhaitable d'introduire dans le système les intentions de conception pendant la construction du modèle CAO. Cette introduction pourra augmenter la charge du

concepteur et atténuer sa créativité et sa productivité. Cependant, il existe bien des situations où cela est nécessaire (re-conception, réutilisation etc.). On a alors besoin d'avoir les raisons de l'existence de toutes les particularités du modèle CAO.

L'objectif visé dans cette section est de trouver un compromis entre ces deux éléments antagonistes cités dans le paragraphe ci-dessus. Il faut donc alléger le fardeau du concepteur tout en permettant l'introduction structurée de toutes les intentions de conception prises en compte lors de la création du modèle géométrique.

Pour y arriver, nous nous basons sur des théories développées par Ericsson et Simon [ERI 1993]. Ils déclarent que les informations dans la mémoire à court terme peuvent être restituées en entier par la rétrospection. Celles déjà dans la mémoire à long terme ne peuvent pas être restituées entièrement. Selon eux, les informations dans la mémoire à court terme mettent juste un certains temps pour passer dans la mémoire à long terme. Sur une base expérimentale, ils ont estimé la limite à 10 minutes environ. Ces faits nous fournissent une idée sur la façon dont les intentions de conception et les raisonnements subséquents peuvent être entrés dans le système CAO au cours du processus de conception. Pratiquement, le concepteur pourra introduire ses premières intentions à la base de la création de l'entité géométrique et commencer à la créer. Nous avons appelé cette première intention « intention primaire ». Cependant, le processus cognitif pendant la conception est dynamique. L'intention primaire peut alors être modifiée et d'autres intentions peuvent apparaître au cours de la création de l'entité. Nous proposons donc que l'ensemble d'intentions de conception à la base de la création de l'entité soit mis à jour tous les 10 minutes ou au besoin, à la fin de la création de l'entité géométrique, notamment si cette dernière opération a duré moins de 10 minutes. Si le concepteur choisit l'option d'entrer ses intentions et qu'après 10 minutes de travail il ne l'a pas encore fait, le cadre que nous proposons prévoit que le système le prévienne par un message écrit, sonore ou autre. Il choisira alors d'introduire les intentions de conception déjà prises en compte ou de continuer à travailler. Ceci sera d'autant plus efficace que cet ensemble d'intentions de conception pourra encore être dans sa mémoire à court terme. La procédure générale pour chaque entité est donnée sur la figure 5.6.

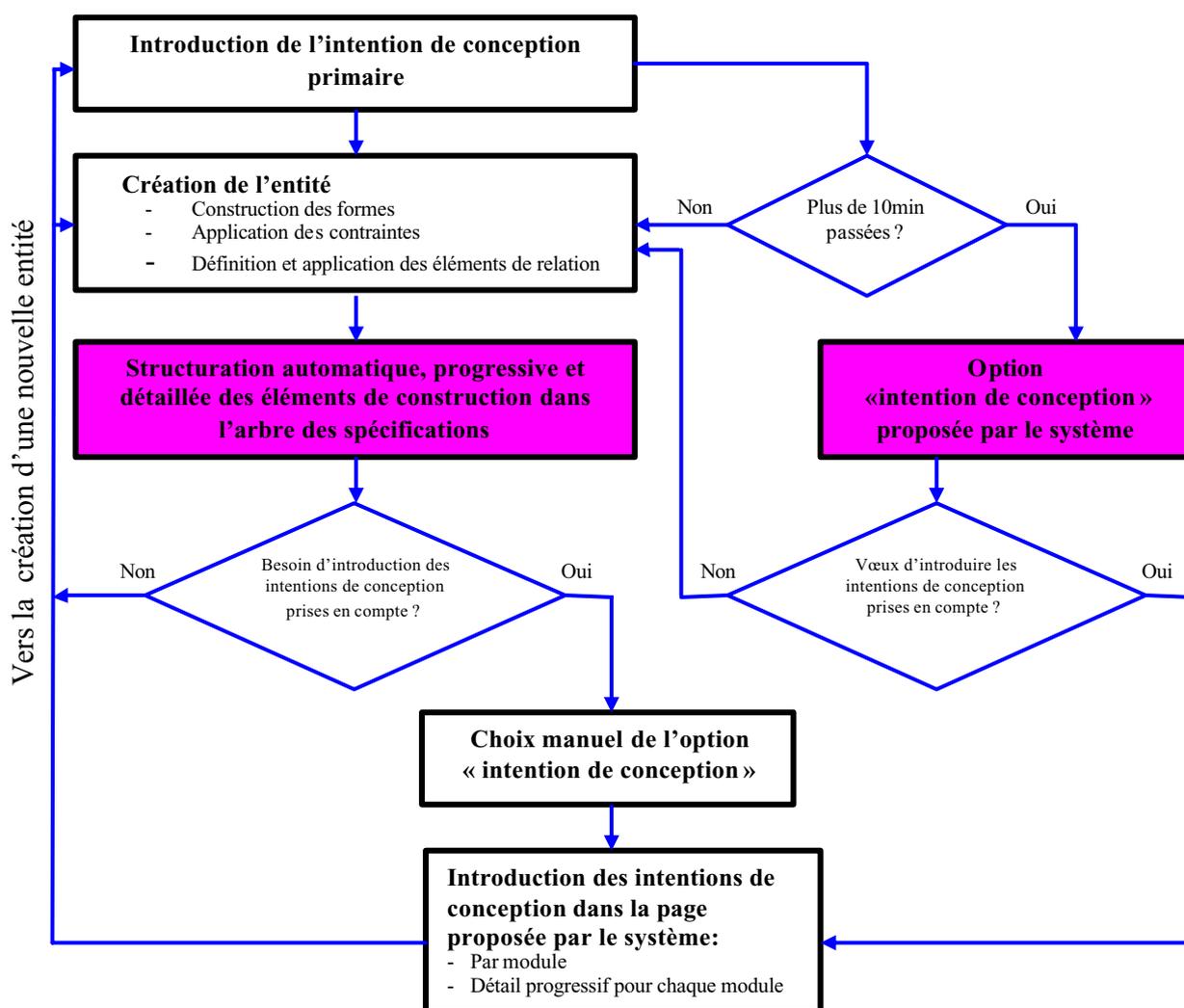


Figure 5.6 – Procédure d'attache de l'ensemble d'intentions de conception à l'entité correspondante

La méthode proposée est à cheval entre les méthodes concourantes et rétrospectives. Elle augmentera un peu le fardeau du concepteur, mais permettra tout de même de donner le maximum d'information sur chaque particularité du modèle géométrique. Tout dépendra de l'enjeu. On pourra donc prévoir par exemple dans les systèmes CAO une option « intention de conception » qui permettra au concepteur de faire le choix d'entrer ou non des intentions de conception après la création ou la modification d'une entité, selon son besoin.

Nous insistons sur le fait que l'introduction de l'ensemble d'intentions de conception ne doit pas être systématique. L'option « intention de conception » que nous proposons d'introduire ne pourra être activée que si le concepteur en a besoin et le souhaite.

Des modules pourront être au préalable définis dans le système pour que le concepteur effectue juste un choix pour entrer ses intentions par type. Les informations détaillées sur les éléments de la conception prises en compte lors de la création d'une entité pourront être

entrées par type. Ces types ont un lien avec le concept de module défini par [SAL 1995] et [BRI 1998].

5.3.2 Structuration des données introduites

Un système d'intentions de conception exige un environnement de multi-représentations que nous avons défini sous forme de modules. La plupart de ces modules de représentations (trois sur cinq) sont disponibles dans l'environnement de développement avancé qui est utilisé aujourd'hui dans l'architecture ouverte des systèmes CAO. Par conséquent, la structure actuelle des systèmes CAO peut servir de base pour le développement d'un système idéal d'intentions de conception.

Le module paramétrique et variationnel et le module des modèles sont bien développés dans les systèmes CAO actuels. Le module des moteurs d'inférences est certes présent, mais n'a été conçu que pour agir sur les paramètres et certaines contraintes. Ainsi, on peut déduire par exemple, la masse, les moments d'inertie, les aires etc. à partir des modèles CAO construits. Pour que ce module soit efficace dans la recherche et la restitution des intentions de conception qui ont été prises en compte lors de la création d'une particularité du modèle CAO, les données introduites à ce sujet doivent être structurées. Les éléments devant intervenir dans cette structuration sont, d'une part, les intentions et raisonnements de conception relevant de la partie conception du modèles d'activité de conception que nous avons proposés au chapitre 4 et, d'autre part, les ensembles, sous-ensembles, pièces, entités, éléments de relation, paramètres et autres contraintes qui sont construits à partir des éléments de la partie représentation de notre modèle d'activité. La structuration des données que nous proposons reviendra à mettre en relation ces éléments, c'est-à-dire les éléments des deux parties de notre modèle d'activité de conception. Le schéma présenté sur la figure 5.7 en est une illustration.

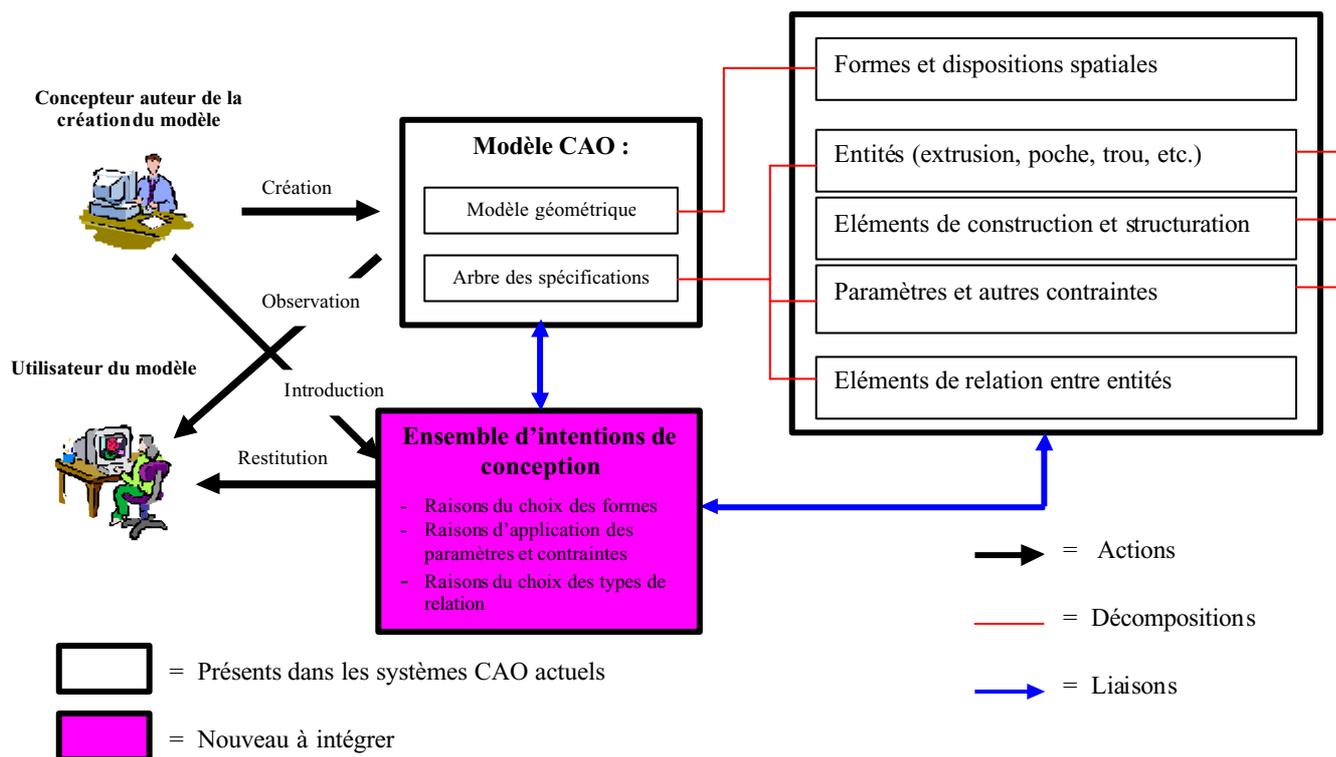


Figure 5.7 – Présentation générale des éléments du cadre défini

On retrouve sur la figure 5.7, les éléments qui sont ordinairement dans un système CAO, et ceux que nous projetons d'ajouter par notre cadre pour le rapprocher d'un système idéal de représentation d'intentions de conception. Pour bien montrer les mécanismes mis en œuvre, nous avons représenté aussi les actions des concepteurs et des utilisateurs du système d'intentions de conception.

Par ailleurs, les instructions données pour notre rétrospection ont eu l'avantage de nous permettre de faire établir une correspondance entre les types d'éléments de la conception et chaque pièce du modèle. Plus finement, on peut étendre cette correspondance à chaque entité du modèle présentée dans l'arbre des spécifications de l'outil CAO. Une illustration concernant l'entité « extrusion 1 » de la pièce 2 (piston) du concepteur 1 est présentée sur la figure 5.8.

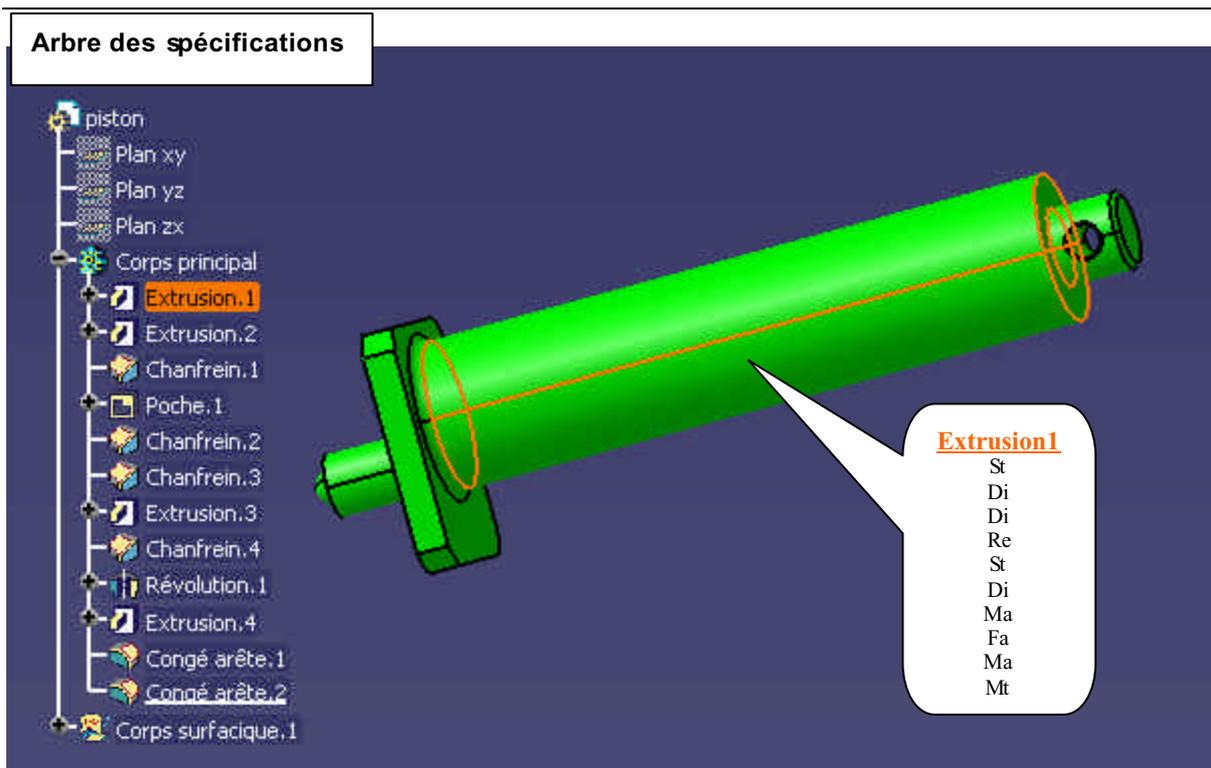


Figure 5.8 – Types d'intentions de conception prise en compte lors de la création de l'entité extrusion 1 de la pièce 2 (piston) du concepteur 1

Les éléments dans cette représentation de la figure 5.8 pourront être présentés dans l'ordre chronologique de leur introduction dans le système. Ainsi, on pourra retracer l'évolution de la conception et répondre à la question du pourquoi et du comment de l'existence d'une entité géométrique dans le modèle.

La figure 5.8 montre exclusivement les types d'intentions de conception pris en compte. Cependant, les détails concernant chaque type et pour chaque entité ont été introduits dans le système. Plus concrètement, le détail de la structure d'organisation des données dans le système CAO lors de l'attache de l'intention de conception à une entité du modèle CAO du produit dans « l'arbre des spécifications », est présenté sur la figure 5.9.

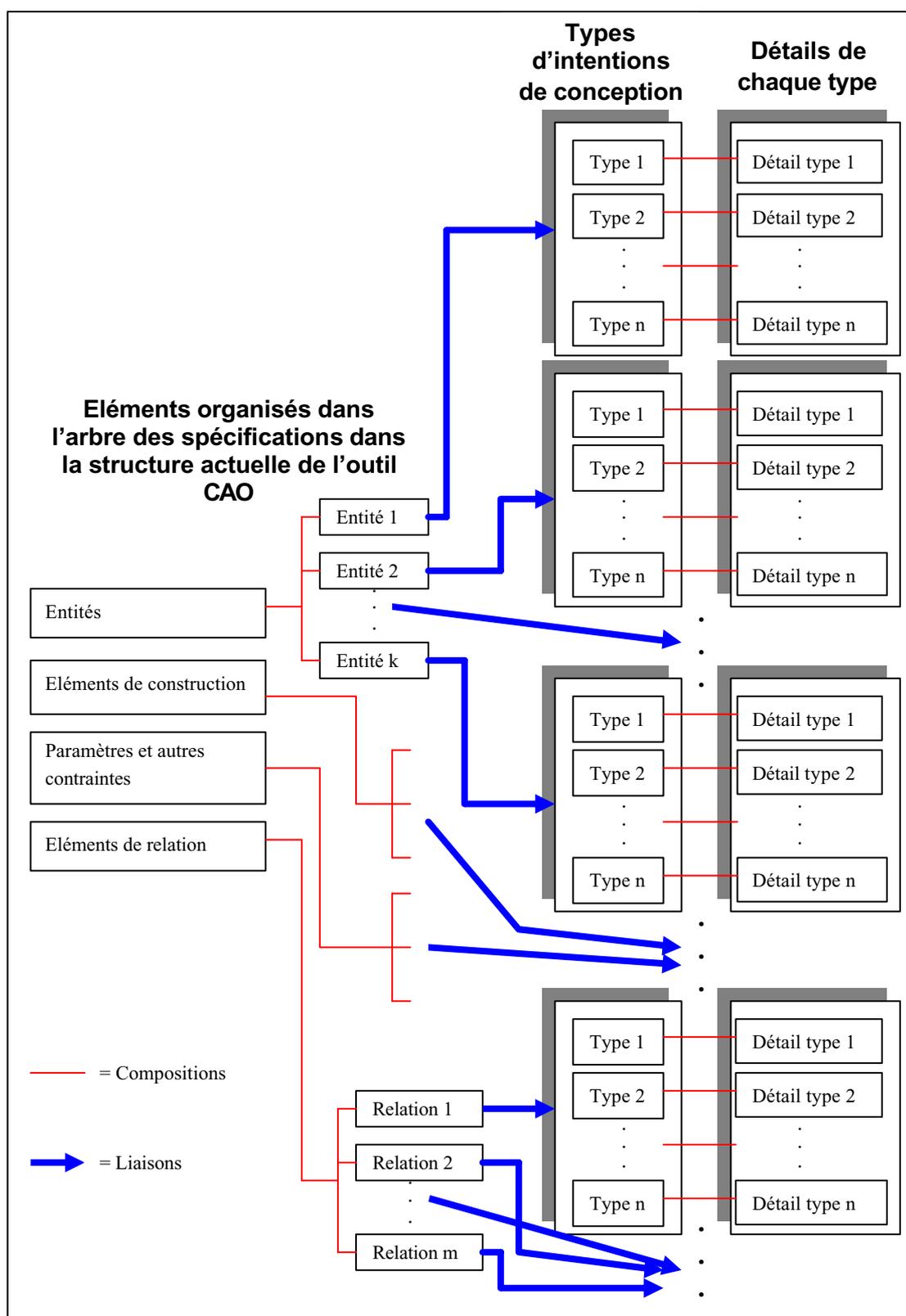


Figure 5.9 – Structure d'organisation des données lors de l'attache d'intentions de conception

La figure 5.9 présente à un premier niveau quelques éléments présents dans le système CAO utilisé et servant à la définition du produit. Ces éléments sont structurés et organisés dans l'arbre des spécifications. L'ensemble d'intentions de conception pris en compte pour chacun de ses éléments lui sera rattaché. Il devra d'abord être structuré par type, puis par détail concernant chaque type et pour chaque élément.

5.3.3 Restitution de l'intention de conception par le modèle CAO

Pour la restitution des informations rattachées à chaque élément de création du modèle géométrique, on pourra imaginer plusieurs niveaux de recouvrement.

Au premier niveau, le système pourra énumérer l'ensemble d'intentions de conception seulement en termes de types pris en compte lors de la création de l'élément considéré. Pour cela, il suffira par exemple de faire le choix de l'option de restitution des types d'intentions de conception, ainsi que celui de l'élément considéré. Éventuellement, les types d'intentions de conception pris en compte pourront s'afficher comme indiqué sur la figure 5.7 et/ou directement dans l'arbre des spécifications conformément à la figure 5.8.

Le deuxième niveau concerne les informations détaillées concernant chaque type. Ainsi, si on désire avoir plus de détail sur le contenu des informations d'un type d'intention rattaché à un élément du modèle CAO, il suffira d'en effectuer la demande, par exemple par un clic de souris sur l'entité et le type d'intentions souhaité. Ainsi, on pourra accéder aux détails concernant les intentions et raisonnements de ce type organisés de façon chronologique lors de la construction de l'entité considérée.

Le schéma global du recouvrement de l'ensemble d'intentions de conception pris en compte lors de la création d'une entité est donné sur la figure 5.10.

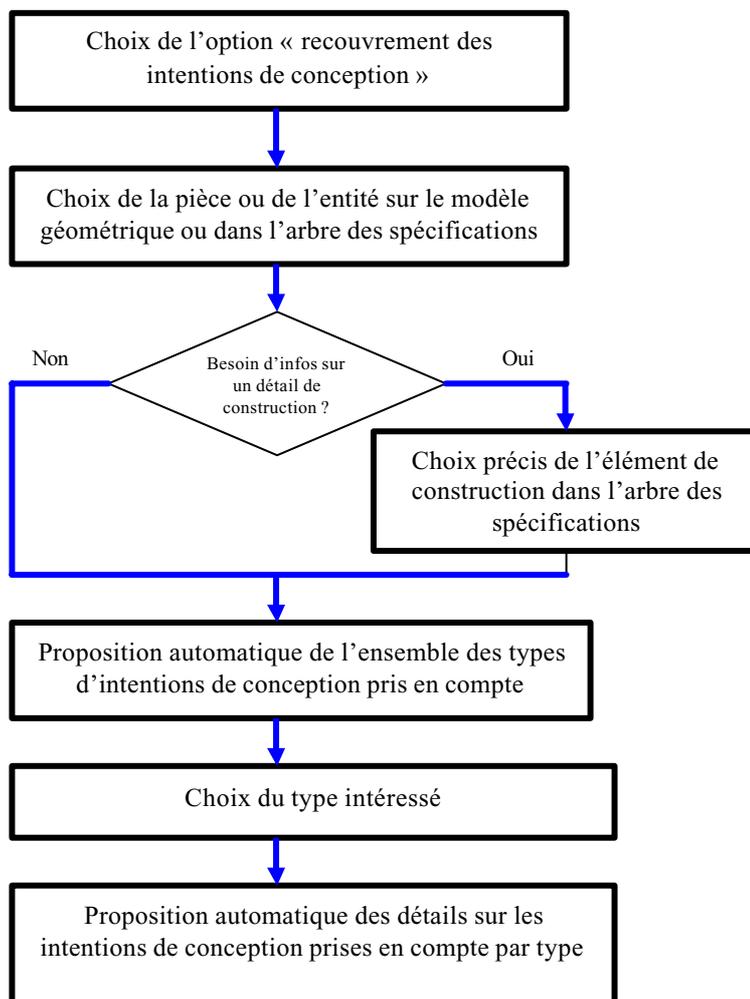


Figure 5.10 – Procédure de recouvrement des intentions de conception sur le modèle CAO

5.4 Conclusion

Le modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO que nous avons proposé dans le chapitre précédent contenait des éléments relatifs aux modules d'historique et de raisonnement d'un système idéal d'intentions de conception présenté au premier chapitre. Mais, il n'y avait encore aucune indication sur la présence de tels modules dans les outils CAO actuels. Pour nous en convaincre, nous avons commencé ce chapitre par la comparaison entre un protocole utilisant la méthode de la verbalisation concurrente de la pensée (CTA) et un protocole utilisant la verbalisation rétrospective de la pensée (RTA).

Cette comparaison s'est faite au regard du nombre de segments présent dans les deux protocoles.

Nous avons effectué au préalable un double filtrage, pour ne retenir que les segments relatifs à la partie conception du modèle d'activités et pour s'assurer qu'une même intention ne sera pas comptabilisée plusieurs fois.

Il en est sorti que le nombre de segments intentionnels dans le CTA était supérieur à celui dans le RTA. Or, ce dernier protocole n'a été fait qu'à l'aide de la représentation CAO produite. Ce qui nous a amené à conclure que le modèle CAO actuel n'était pas encore en mesure de restituer toutes les intentions de conception prises en compte lors de sa création. Bien que l'historique de construction des entités soit accessible dans les systèmes CAO actuels, il était encore impossible de reconstituer l'ensemble des intentions de conception prises en compte lors de la création de ces entités. Les modules d'historique et de raisonnement de conception ne sont donc pas bien représentés au sein des outils CAO actuels.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons proposé un cadre qui pourrait permettre d'attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. Ceci pourra permettre d'enrichir les modules d'historique, de raisonnement et d'inférence dans les systèmes CAO pour les rendre plus complet.

Les modules d'historique et de raisonnement sont construits par la procédure d'introduction des intentions de conception dans le système. Cependant, ils ne peuvent vraiment être opérationnels que si les intentions introduites sont facilement restituées et de façon structurée. Nous avons alors proposé une structuration des données dans le système pour perfectionner le module du moteur d'inférence. Ce module du moteur d'inférence agira dans la restitution, au besoin, des intentions de conceptions introduites dans le système. La procédure de restitution est aussi proposée.

Conclusion générale

Nous avons pour ambition de contribuer à la définition et à la représentation des intentions de conception. Pour mieux cadrer nos travaux, nous avons commencé par donner une définition synthétique du terme « intentions de conception » en rapport avec la bibliographie.

Un de nos premiers apports concerne la définition d'un système idéal d'intentions de conception comportant cinq modules : le module d'historique de conception, le module de raisonnement de conception, le module paramétrique et variationnel, le module des modèles et le module des moteurs d'inférence. Ces modules ont été définis et décrits. Ils peuvent être considérés comme des unités indépendantes ou combinées. Quelques unes, mais pas toutes, se trouvent dans des systèmes d'intentions de conception que nous avons rencontré dans la littérature.

Nous avons ensuite adopté une approche descendante pour décrire la représentation par les modèles, jusqu'à la modélisation géométrique que nous avons estimée pouvant servir de base à la définition d'un système idéal d'intentions de conception. Les différents modes de représentation géométrique ont été alors donnés et décrits, notamment au sein des systèmes CAO, qui apparaissent comme des systèmes centrés sur les modèles géométriques et présentent déjà en leur sein, en plus du module des modèles, d'autres modules d'un système idéal d'intentions de conception, dont les plus évidents sont le module paramétrique et variationnel et le module des moteurs d'inférence. Cependant, il restait encore à savoir si les modules d'historique et de raisonnement de conception sont aussi bien représentés et si le module des moteurs d'inférence présent est capable d'agir aussi sur eux. Pour y arriver, il nous est apparu nécessaire d'analyser et de comprendre un processus de conception à l'aide d'outil CAO. Il était alors question de définir une méthodologie qui permettra d'atteindre cet objectif.

Un des apports majeurs de cette thèse se trouve dans la définition et le développement de cette méthodologie. Nous avons d'abord situé notre travail dans un schéma traditionnel de recherche et développement. Nous avons été amenés à développer une recherche qui permettra de comprendre une séquence de conception à l'aide d'outil CAO. L'objectif étant de contribuer à la définition au besoin des outils capables de suppléer les systèmes CAO actuels dans la représentation des intentions de conception. Ceci devra s'inscrire dans une démarche. Cette démarche globale de recherche, développée au laboratoire M3M et dans laquelle s'inscrivent nos travaux, a été synthétiquement présentée.

Nous avons ensuite fait le choix de la méthode du *protocol analysis* pour appliquer la démarche. Un plan d'exécution de la méthode a été proposé, que nous avons présenté en deux temps : la méthode expérimentale et la méthode d'analyse. Dans le volet expérimental, nous avons été amenés à aborder les critères de choix du problème de conception pour les expérimentations et la présentation des différents types de verbalisation qui se trouvent au

cœur de la méthode. La méthode d'analyse est ensuite présentée. Elle consiste à structurer et synthétiser des données par la segmentation et le codage.

Nous avons commencé l'application de la méthode décrite par la définition et le montage de nos expériences de conception. Nous avons commencé par l'analyse d'une expérience préliminaire qui semblait être proche de nos attentes. Cette analyse nous a permis d'optimiser les conditions expérimentales pour nos expériences. Ainsi, nous avons développé des instructions pour parfaire la qualité de la verbalisation et nous avons opté pour une répétition d'expériences avec le même problème de conception, mais avec quatre concepteurs différents.

Concernant ces expériences proprement dites, nous avons d'abord décrit le problème de conception qui a été défini conformément à des caractéristiques prescrites dans la bibliographie pour de telles expériences. L'organisation de l'expérience a été commentée. Nous avons ainsi présenté les différentes phases expérimentales et l'objectif visé par chacune d'elles, notamment pour ce qui concerne le CTA (verbalisation concurrente de la pensée) et le RTA (verbalisation rétrospective de la pensée). Ensuite, le déroulement de l'expérience proprement dit a été présenté. Chaque phase a alors été décrite et l'introduction progressive des instructions a été commentée. Enfin, les données brutes obtenues de l'expérience et qui ont été utiles dans nos analyses ont été également présentées.

La première analyse que nous avons faite concernait les données obtenues du CTA. Nous avons alors entrepris d'appliquer les méthodes déjà présentées. Ainsi, les données ont été segmentées puis codées. Nous avons utilisé une méthode de segmentation issue de la bibliographie et nous avons développé nos propres catégories de codage selon l'objectif de notre travail. Ces catégories de codage sont constituées des différentes activités que nous avons observées dans le protocole. Elles ont été distinctement appliquées à la verbalisation et à la vidéo. Les catégories de codage appliquées à la verbalisation sont constituées en substance des différentes pensées du concepteur, alors que celles appliquées à la vidéo sont essentiellement liées à ses gestes. Nous avons ensuite proposé une base clarifiée et « saine » de croisement des segments codés pour une analyse conjointe des deux types de données.

Un autre de nos apports concerne la présentation d'une méthode de fiabilité utilisée dans d'autres domaines d'investigation et que nous avons adaptée et appliquée à nos études. Ainsi, elle a été appliquée à la segmentation et au codage pour avoir des données crédibles, qui ont permis de rendre les résultats que nous avons obtenus plus justes.

L'étude de l'importance de chaque activité dans les protocoles du CTA et des liens entre elles nous a permis de proposer un modèle d'activité de conception à l'aide d'outil CAO. Dans ce modèle, une explication des liens entre ces différents éléments a été donnée. Une étude quantitative des différents éléments du modèle dans le protocole a été faite, dans le but de confirmer la pertinence de leur existence dans un tel processus. Les liens étudiés se sont

faits entre les activités détectées par la verbalisation. Pour ce qui concerne les activités détectées par la vidéo, une correspondance a été faite avec les activités détectées à l'aide de la verbalisation. Ces activités détectées à l'aide de la vidéo ont été regroupées sous le terme « action » et présentées dans notre modèle d'activité.

Toutes les activités du modèle ont été regroupées en deux parties : une partie conception et une partie représentation. L'importance de la partie représentation a été constatée. Cette importance pourrait montrer la portée des contraintes liées à la manipulation de l'outil CAO pour modéliser le produit. La partie conception du modèle présente deux éléments représentatifs des modules d'historique et de raisonnement de conception. Cependant, ce constat ne résout pas le problème de savoir si ces modules sont intégrés dans le système CAO utilisé ou non.

Pour en faire la vérification, nous avons fait une comparaison entre le CTA et le RTA. Cette comparaison s'est faite au regard du nombre de segments présents dans les deux protocoles. Nous avons effectué au préalable un double filtrage, pour ne retenir que les segments relatifs à la partie conception du modèle d'activités et pour s'assurer qu'une même intention ne sera pas comptabilisée plusieurs fois. Il en est ressorti que le nombre de segments intentionnels dans le CTA était supérieur à celui dans le RTA. Ce qui nous a amené à conclure que le modèle CAO actuel n'était pas encore en mesure de restituer toutes les intentions de conception prises en compte lors de sa création. Bien que l'historique de construction des entités soit accessible dans le système CAO utilisé, il est encore impossible de reconstituer l'ensemble des intentions de conception pris en compte lors de la création de ces entités. Les modules d'historique et de raisonnement de conception ne sont donc pas bien représentés dans un tel système CAO.

Nous avons apporté une autre contribution, en proposant un cadre qui permet d'attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. Ceci pourra permettre d'enrichir les modules d'historique, de raisonnement et des moteurs d'inférence dans les systèmes CAO pour les rendre plus complets. Les modules d'historique et de raisonnement sont construits par la procédure d'introduction des intentions de conception dans le système que nous avons proposée. Mais ils ne peuvent vraiment être opérationnels que si les intentions introduites sont facilement restituées et de façon structurée. Nous avons également proposé une structuration des données dans le système pour perfectionner le module du moteur d'inférence. Ce module agira dans la restitution, au besoin, des intentions de conception introduites dans le système. La procédure de cette restitution a été décrite.

Notre travail pourrait être rendu plus complet par des travaux futurs, tels que ceux qui suivent.

Le montage des expériences diversifiées avec des objectifs différents de ceux visés dans cette thèse pour mieux outiller la méthode. On pourra alors imaginer de les faire avec des

concepteurs plus expérimentés et la comparaison avec celles que nous avons réalisées pourra permettre de consolider et de valider l'application de la méthode dans la recherche en conception telle que définie par les axes de notre équipe de recherche.

De plus, la conception du produit lors du CTA avait été prévue pour se faire en deux phases et avec deux concepteurs différents, avec le passage de relais du premier au second. Ceci avait pour but de voir comment le second concepteur pouvait prendre en main la suite du travail en utilisant uniquement les explications et le modèle CAO produits par le premier. Ceci pourrait donner une autre vue sur la capacité de prise en compte des intentions de conception par les modèles CAO. Il serait donc intéressant de compléter les expériences par la deuxième phase.

La place centrale de l'observation dans le modèle d'activité de conception que nous avons proposée nous amène à penser à des expériences avec une meilleure visualisation du modèle en construction par l'utilisation de grands écrans, combinés ou non à des techniques de réalité virtuelle, afin d'examiner l'apport de tels dispositifs à la conception de produits.

Une autre perspective concerne la poursuite des analyses des données obtenues. Ainsi, on pourra par exemple suivre l'évolution de chaque activité dans le temps et reformuler notre modèle d'activité de conception avec la séparation de l'observation dans la partie conception (OC) et dans la partie représentation (Or).

La mobilisation de plusieurs acteurs dans nos expériences a certes augmenté la fiabilité de nos propositions. Cependant, il serait aussi intéressant d'étudier les différences individuelles et leurs influences dans les résultats obtenus.

Coté outils, il serait aussi intéressant de penser à contribuer au développement des spécifications qui pourraient permettre de diminuer les contraintes dues à la manipulation de l'outil CAO, telles qu'elles ont été détectées par l'importance de la partie représentation dans notre modèle. En effet, la connaissance de ces contraintes pourrait contribuer au développement d'un modèle ou d'un outil capable de les minimiser. Le modèle d'activité de conception présenté dans ce chapitre constitue un pas vers l'atteinte de cet objectif.

L'analyse de comparaison fine que nous avons projeté sur le type d'intentions de conception par domaine de travail nous a permis de constater que les intentions de conception énumérées lors de la construction des pièces CAO étaient mieux rendues que celles énumérées pendant la lecture et l'analyse du problème de conception et pendant les dessins à main levée. Or, le cadre que nous avons proposé n'agit que sur les entités CAO. Il serait alors intéressant de développer des supports (outils) qui permettraient de capitaliser les intentions de conception énumérées lors de l'analyse du problème de conception et les dessins à main levée.

Enfin, le cadre que nous avons proposé pourrait mener au développement d'un outil qu'il serait intéressant d'implémenter et de tester.

Références bibliographiques

- [ADE 1989] Adelson, B., « Cognitive research: uncovering how designers design », *Research in Engineering Design* 1(1), pp 35-42, 1989.
- [AKI 1978] Akin, Ö, « How do architects design? », in J.-C. Latombe (Ed.) « Artificial Intelligence and Pattern Recognition in Computer Aided Design », *IFIP/ North-Holland*, New York, 1978.
- [AKI 1995] Akin, O and Lin, C « Design protocol data and novel design decisions » *Design Studies*, Vol. 16 No 2 (1995) pp 211–236.
- [AND 1976] Anderson J. R., « Language, memory, and thought », *Erlbaum*, Hillsdale, NJ, 1976.
- [BAL 1990] Ballay, J., « An experimental view of the design process », dans W. B. Rouse and K.B. Roff (Eds), « System Design: Behavioural Perspectives on Designers », *Tools and Organisations*, North-Holland, New York, 1990.
- [BAS, 1990] Baster I., « Transformational maintenance by reuse of design histories », *Ph.D. dissertation, Information and Computer Science*, University of California at Irvine, 1990.
- [BAY 1996] Baya V., Leifer J. L., « Understanding information management in conceptual design », dans Cross N., Christiaans H., Dorst K. (Eds) « Analysing design activity », *John Willey & Son*, New York, 1996.
- [BEZ, 1986] Bézier P., « Mathématiques et CAO : courbes et surfaces », volume 4, *Hermès*, 1986.
- [BIR, 1997] Birmingham R., 1997, « Understanding Engineering design: context, theory, and practice » *Prentice Hall*, New York.
- [BOD, 1998] Bodker Suzanne, « Understanding representation in design », *Human-Computer Interaction*, 1998, vol. 13, pp. 107-125.
- [BOR 2000] Boren, M. T. and Remey, J. 2000, « Thinking aloud: reconciling theory and practice » *IEEE transactions on professional communication*, 43, 261-278.

- [BOZ 2003] Bozon C., Decreuse C., Maranzana R., Garro O., « Intégration des connaissances de fabrication dans un contexte de CFAO », *PRIMECA*, La Plagne, 2003.
- [BRA 2000] Branch, J. L. 2000, « Investigation the information-seeking processes of adolescents: The value of using think aloud and think after » *Library & Information Science Research*, 22, 371-392.
- [BRI 1998] Brissaud D., Garo O., « Conception distribuée, émergence », in MICHEL TOLLENAERE, « conception des produits mécaniques », *Ed. Hermes*, Paris, 1998.
- [CHA 1990] Chan, C.-S., « Cognitive processes in architectural design problem solving », *Design Studies*, 11(2) (1990) 60-80.
- [CHE, 1991] Chen A. « A Computer based Design History », Thesis for department of mechanical design, *Oregon State University*, july 1991.
- [CHI, 2000] Ching-Chih Tai and Ming-Chih Huang, « The processing of data points basing on design intent in reverse engineering », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 13, 2000, Page 1913-1927.
- [CHO 2003] Choulier Denis, « Formalisation de la démarche de recherche CID » Rapport interne n°03-01 28 avril 2003, CID, Laboratoire M3M, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [CHO 2004] Choulier D., Garro O., Pena E., « Design acts – the analysis of a cooperative design experiment », *COOP'04 Scenario-Based Design of Cooperative Systems*, Nice, France, 11- 14 Mai 2004.
- [CHR 1992] Christiaans, H. and C. Dorst, « Cognitive models in industrial design engineering: a protocol study », in D. L. Taylor and D. A. Stauffer (Eds), *design Theory and Methodology – DTM92*, ASME, New York, 1992.
- [CLA 1934] Claparède E., « genèse de l'hypothèse » *Archive de psychologie*, 24, 1-155, 1934.
- [CRO 1992] Cross N., Dorst C. and Roozenburg N. (Eds), « Research in Design Thinking », *Delft University Press*, Delft, 1992.
- [CRO 1996] Cross N., Christianns H. and Dorst K. (Eds), « Analysing Design Activity », *Ed. John Willey and Sons Ltd*, West Sussex, 1996.
- [CRO 2005] Crochemore S., « Méthode Delphi », *Technique de l'ingénieur*, Ref. AG1050, juillet 2005.
- [DEG 1965] De Groot A. D., « Thought and Choice in Chess », *Mouton, The Hague.*, 1965.

-
- [DOR 1995] Dorst K., Dijkhuis J., « Comparing paradigms for describing design activity » *Design Studies*, vol.16 pp. 261-274, 1995.
- [DOR, 1996] Dorst K., « Design Problem and its Structure », dans Cross N., Christiann H. and Dorst K., (Eds), « Analysing Design Activity », *Ed. John Willey and Sons Ltd*, West Sussex, 1996.
- [DUN 1926] Duncker K., « A qualitative (experimental and theoretical) study of productive thinking (solving and comprehensive problems) » *Pedagogical Seminary*, Vol. 33, pp. 642-708, 1926.
- [DYM, 1995] Dym C., « Engineering Design: A synthesis of views », *Cambridge University Press*, New York, 1995.
- [EAS 1970] Eastman, C. M. « On the analyse of intuitive design processes », in G. T. Moore (Ed), « Emerging Methods in Environmental Design Planning », *MIT Press Cambridge, MA*, 1970.
- [ECK 1988] Eckersley, M., « The form of design processes: a protocol analysis study » *Design Studies*, Vol 9 No 2 (1988) pp 86–94.
- [ERF 1986] Erffmeyer R. C., Erffmeyer E., et Lane I. M., « The Delphi technique: an empirical evaluation of the optimal number of rounds », *Group and organization studies*, 11, 1-2, March-June 1986, pp. 120-128.
- [ERI 1993] Ericsson K., A., Simon, H., A., « Protocol Analysis: Verbal reports as data ». A Bredford Book, *The MIT Press*, Cambridge, Massachusetts, London, England 1984, 1993, Massachusetts Institute of Technology.
- [ERI, 1999] Eris O., Hansen P., Mabogunje A., Leifter L., « Toward a pragmatic ontology for product development projects in small teams » *Proceeding of International Conference on Engineering Design (ICED 99)*, Munich, Germany, August 24-26, 1999.
- [FAU, 2000] Faucher, D. and Nivet, M. L., « Playing with design intents: integrating physical and urban constraint in CAD », *Automation in Construction* 9, 2000 pp 93-105.
- [FEL, 2001] Felicia L. M., Noé V. H., Joshua D S, and Jami J. S., « Influence of design representation on effectiveness of idea generation », *Proceeding of DETC'01: ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computer Information in Engineering Conference* Pittsburgh, Pennsylvania, September 9-12, 2001, pp. 39-48.

- [FOZ 1973] Foz, A. « Observations on designer behaviour in the parti », *DMG-DRS journal: Design Research and Methods*, 7(4) 1973, pp 320-323.
- [GAN, 1994] Ganeshan R., Garrett J., Finger S, « A framework for representing design intent », *Design Study*, Vol. 15, No 1, 1994, pp 59-84.
- [GAR 1987] Garner R., « Metacognition and reading comprehension », *Ablex*, Norwood, NJ, 1987.
- [GAR, 1993] De La Garza and P. Alcantra Jr, « Applications of design intent in value engineering », *AIENG '93 Conference*, Toulouse, France, 1993.
- [GEO, 1995] Geol V., « Sketches of thought », *MIT Press*, Cambridge, MA, 1995.
- [GER 1998] Gero J. S., Thomas M. N., « An approach to the analysis of design protocols », *Design studies* 19, Elsevier Science Ltd, 1998, pp 21-61.
- [GER 2001] Gero J. S. and Hsien-Hui Tang, « The differences between retrospective and concurrent protocols in revealing the process-oriented aspects of the design process », *Design Studies* 22 (2001) 283–295.
- [GOL 1990] Goldschmidt, G., « Linkography: assessing design productivity », *Proc. Tenth European Meeting on Cybernetics and Systems Research*, Vienna, 1990.
- [GOL 1991] Goldschmidt, G « The dialectics of sketching » *Creativity Research Journal* Vol 4 No 2 (1991) pp 123–143.
- [GOL 1994] Goldschmidt, G., « On visual design thinking: the vis kid of architecture », *Design Studies*, vol. 15, pp.158-174, 1994.
- [GOL 1996] Goldschmidt G., « The designer as a team of one », dans Cross N., Christianns H. and Dorst K. (Eds), « Analysing Design Activity », *Ed. John Willey and Sons Ltd*, West Sussex, 1996.
- [GOO 1994] Goodwing C., « Professional vision », *American Anthropologist*, 96, pp. 606-633, 1994.
- [GOU 1997] Goupy J., « Plans d'expériences », *Techniques de l'Ingénieur*, Vol papier n° : AGC4, Dossier : P230, 09/1997.
- [GRA 2001] GRACC, « Une expérience de conception collaborative à distance ». GRACC Groupe de Recherche sur l'Activité de Conception Collaborative, 7^{ème} Colloque AIP- PRIMECA, La Plagne, France, 2-4 , pp 145 - 154, avril 2001.
- [GRU, 1993] Gruber T., and Russell D., « Generative design rationale: beyond the record and replay paradigm », *Stanford Knowledge system lab.*, KSL 92-59, 1993.

-
- [HAD 2002] Hadj-Hamou M., « Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes », thèse de doctorat du Centre Génie Industriel, *Ecole des Mines d'Albi-Carmaux*, 2002.
- [HEN, 1993] Henderson, Mark R. « Representing functionality and design intent in product models », *2nd ACM Solid Modelling*, Montreal, 1993, pp 387-396.
- [HEN, 1999] Henderson K., « On line and on paper: visual representation, visual culture, and computer graphics in design engineering » *MIT Press*, Cambridge, MA, 1999.
- [ISH, 2002] Ishino Y., and Jin Y., « Estimate design intent: a multiple genetic programming and multivariate analysis based approach », *Advanced Engineering Informatics*, Volume 16, Issue 2, April 2002, Pages 107-125.
- [JOS, 2004] Joshua D. S., Jami J. S., « Representation in Engineering design : A framework of classification », *Proceeding of DTC'04, ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, du 28 septembre au 2 octobre 2004, Salt Lake City, Utah, USA.
- [KAV 2001] Kavakli M., Gero, J. S., « Sketching as mental imagery processing ». *Design Studies*, Volume 22, Issue 4, Pages 347-364. July 2001.
- [KAV 2002] Kavakli, L., Gero J., S., « The structure of concurrent cognitive actions: a case study on novice and expert designers ». *Design Studies*, Volume 23, Issue 1, Pages 25-40. January 2002.
- [KIL 1968] Kilpatrick J., «Analyzing the solution of word problems in mathematics : an exploratory study», Doctoral dissertation, Stanford University, 1968.
- [KLE 1989] Klein, M. and S. C.-Y. Lu, « Conflict resolution in cooperative design », *Artificial Intelligence in Engineering*, 4(4), 1989, pp 168-180
- [KRU 1976] Krutetskii V. A., « The psychology of mathematical problem solving », *University of Chicago Press*, Chicago IL, 1976.
- [KUA 2005] Kuate G., Choulier D., Deniaud S., Ferney, M., « Intentions de conception et Intentions de Représentation dans une séquence de conception à l'aide d'un outil CAO », *Congrès International du Génie Industriel (CIGI2005)*, 7-10 juin 2005, Besançon, France.
- [KUA 2006a] Kuate G., Choulier D., Deniaud S., Ferney, M., « Protocol Analysis for Computer-Aided Design: A model of design activities », *International Symposium series on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE 2006)*, April 18–22, 2006, Ljubljana, Slovenia.

- [KUA 2006b] Kuate G., Choulier D., Deniaud S., « Framework for Attaching the Design Intent to the Product CAD Model », *6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME2006)*, May 17-19, 2006, Grenoble, France.
- [KUU 2000] Kuusela, H. and Paul, P. 2000, « A comparison of concurrent and retrospective verbal protocol analysis », *American Journal of Psychology*, 113, 387-404.
- [KYN, 1995] Kyng, M., « Creating context for design » in J. Carrol (Ed.), « scenario-based design for human-computer interaction » *Wiley*, New York, pp. 85-107. 1995.
- [LAC, 1987] Lacour P.G., «Mathématiques et CAO», volume 3 : calculs scientifique, *Hermès*, Paris 1987.
- [LAK, 1992] Lakin F., Baya V., Cannon D., Brereton M., Leifer L. and Toye G., « Mapping design Information », *AAAI 92 Workshop*, 1992.
- [LAR 1987] Larkin, J and Simon, H A « Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words? » *Cognitive Science* Vol. 11 pp. 65–99, 1987.
- [LAS 1997] Laszlo H., Imre J. R., « Attaching Knowledge to Product Model for Representation of Human Intent » *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v 2, 1997, pp. 1580-1585.
- [LAS 1998] Laszlo H., Imre J. R., « Description Design Intent in Product Models » *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v 2, 1998, pp. 1312-1316.
- [LAT, 1990] Latour B., 1990, « Drawing things together », in M Lynch & S. Woolgar (Eds), « Representation in scientific practice », Cambridge, MA, *MIT Press*, pp. 19-68.
- [LIN 1975] Linstone H. A. and Turoff M. « The Delphi Method. Techniques and Applications » *Addison-Wesley*, Reading, MA 1975.
- [LLO 1995] Lloyd, P, Lawson, B and Scott, P « Can concurrent verbalization reveal design cognition? » *Design Studies*, Vol 16 (1995) 237–259.
- [LON 2004] Lonchamp P., « Co-évolution et processus de conception intégrée de produits : Modèle et support de l'activité de conception », thèse de doctorat l'*Institut National Polytechnique de Grenoble*, 2004.
- [LOX 1994] Loxterman, J. A., Beck, I. L. and McKeown, M. G. 1994, « The effect of thinking aloud during reading on students' comprehension of more or less coherent text » *Reading Research Quarterly*, 29, 353-367.

-
- [MAA 2003] Maake J. V. D. H., Menno D. T. J., Peter J. S. « Retrospective vs. Concurrent think-aloud protocols : testing the usability of online library catalogue », *Behaviour & Information Technology*, vol. 22, N°5 339-351.
- [MCG 1992] McGinnis, B D and Ullman, D G, « The evolution of commitments in the design of a component », *Journal of Mechanical Design*, Vol 114 No 1 (1992) pp 1–7.
- [MCG, 1998] McGrown A., Green G., Rodgers P., « Visible ideas: information patterns of conceptual sketch activity », *Design Studies*, vol. 19, No 4, pp.431-453, 1998.
- [MCK, 1980] McKim R., « Experience in visual thinking » *Wadsworth, Inc.* Belmont, CA., 1980.
- [MCN 1994] McNeill T. and Edmonds E. A. « An empirical study of conceptual electronic design ». *Revue des Sciences et Techniques de la conception*, Vol 3(1) 1994 PP 61-86.
- [MEK, 1998] Mekhilef M., Yannou B., « Conception intégrée assistée par ordinateur », *Techniques de l'ingénieur*, (www.techniques-ingenieur.fr), Réf. BM5006, 1998.
- [MEN, 2003] Meniru K., Rivard H. and Bedard C., « Specifications for computer-aided conceptual building design », *Design Studies*, 24, 2003, pp 51-71.
- [MIN 1993] Minnman, S. and L. Leifer, « Group engineering design practice: the social construction of a technical reality », *Proc. Int. on Engineering Design ICED93* (Ed. N. Roozenburg), The Hague: Heurista, Zürich 1993.
- [MOS, 1985] Mostow J., 1985, « Toward Better Models of Design », *Process, AI Magazine*, 6(1) PP 44-57.
- [MOV 1996] Movahedkhah Reza « Conception de deux machines de test de colonne de direction de Peugeot Citroën », Projet de fin d'étude d'ingénieur, *Ecole Polytechnique de Téhéran Sud*, 1996.
- [MUN, 2003] Muna D., Hana S., Kima J., Ohb Y., « A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach », *Computer-Aided Design*, 35, 2003 pp. 1171–1179.
- [MYE,1999] Myers KL, Zumel NB, Garcia P. « Automated capture of rationale for the detailed design process », *Proceedings of the Eleventh Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence, (IAAI' 99)*, 1999.
- [NEW 1972] Newell A. and Simon H. A., « Human Problem Solving », *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ., 1972.

- [NIE 1994] Nielsen, J. 1994, « Estimation the number of subjects needed for a thinking aloud test » *International Journal of Human-Computer Studies*, 41, 385-397.
- [OLS 1992] Olson, G. M, et al., « Small group design meetings : an analysis of collaboration », *Human-Computer Interaction* 7, 1992, pp 347-374.
- [PAH 1996] Pahl G., Beitz W., «Engineering Design: a Systematic Approach », *Springer-Verlag*, London, 2nd édition, 1996.
- [PEN 2003] Pena E, Choulier D., Garro O., « A proposition to capitalize and share the logic of design » *CIRP*, 2003.
- [PIE, 2005] Piegl L. A., « Ten Challenges in computer-aided design », *Computer-Aided Design* 37, 2005, pp 461-470.
- [PRU 2005] Prudhomme G., Brissaud D., Choulier D., « Clustering Engineering Design Research: A Methodological Framework », *ICED*, Melbourne, August 15 – 18, 2005.
- [PUR 1994] Purcell T., Gero J., Edwards H., McNeill T. « The data in design protocols: the issue of data coding, data analysis in the development of models of the design process », dans Gero J. S., Sudweeks F., (eds) « Artificial intelligence » in *design '94 Kluwer*, Dordrecht (1994) pp 225–252.
- [PUR, 1998] Purcell A., Gero J., « Drawing and the design process », *Design Studies*, vol. 19, No 4, pp. 389-430, 1998.
- [REG, 2000] Reglis W., Hu X., Atwood M., Sun W., 2000, « A survey of design rational systems: Approach, Representation, Capture and retrieval », *Engineering with Computers*, 16, pp. 209-235.
- [ROS, 1998] Rosenman M. A. and Gero J. S., «Purpose and Function in design: from the socio-cultural to the techno physical », *Design Studies*, 19 (1998), pp 161-186.
- [RUS 1989] Russo, J. E., Johnson, E. J. and Stephens, D. L. 1989, « The validity of verbal protocol » *Memory and Cognition*, 17, 759-769.
- [SAU, 1997] Saucier A., « Un modèle multi-vues du produit pour le développement et l'utilisation de systèmes d'aides à la conception en ingénierie mécanique », Thèse de doctorat de l'*Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 1997.
- [SCH 1984] Schön D.A., «Problems, frames and perspectives on designing », *Design studies* 5(3) 1984, pp 132-136.
- [SCH 1988] Schön D. A., « Designing: rules, types and worlds », *Design Studies*, 9(3), 1988, pp 181-190.
- [SCH, 1992] Schön, D.A et Wiggins, G., « Kinds of seeing and their functions in designing », *Design studies*, vol 13 N°2 1992 PP 135-156.

-
- [SHA, 2001] Shah J., Vargas-Hernandez N., Kulkarni S., and Summers J., 2001 « Collaborative sketching (S-Sketch) as an idea generation technique for engineering design », *Journal of Creative Behaviours*, V35(3), pp. 168-198, 2001.
- [SIL 1972] Silvira J. M., « Incubation : The effects of interruption timing and length on problem solution and quality of problem processing », Doctoral dissertation, *University of Oregon*, 1972.
- [SIU, 2001] Siu N.W.C., Dilnot C., « The challenge of the codification of tacit knowledge in designing and making: a case study of CAD systems in the Honk Kong jewellery industrie », *Automation in Construction* 10, 2001, pp. 701-714.
- [STA, 1991] Star S. L., « Power, technologies and the phenomenology of standards: on being allergic to anions » *Sociological Review Monograph*, No.38, pp. 1-17, 1991.
- [STU, 2002] Stum K., Sherrill R. M « Design Intent and Basis of Design: Clarification of Term, Structure, and Use », *ASHRAE Transactions*, vol. 108 PART 2, 2002, p 1191-1192, 2002.
- [SUW 1996] Suwa, M and Tversky, B « What architects see in their design sketches: implications for design tools », *Human factors in computing systems. In CHI'96 conference companion ACM*, New York (1996) pp 191–192.
- [SUW 1998] Suwa, M, Purcell, T and Gero, J S « Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions » *Design Studies* Vol 19 (1988) 455–48.
- [TAN 1991] Tang J. C., « Findings from observational studies of collaborative work », *International Journal of Man-Machine Studies* 34, 1991, pp 143-160.
- [TAY 2000] Taylor, K. L. and Dionne, J. P. 2000, « Accessing problem-solving strategy knowledge: The complementary use of concurrent verbal protocols and retrospective debriefing » *Journal of education psychology*, 29, 413-425.
- [TEA 2001] Teague, R. De Jesus, K. and Nunes-Uno, M., « Concurrent vs. post-task usability » *Conference on Human Factors and Computing Systems*, Seattle, 2001, pp. 289-299.
- [TFL] TLFi, Trésor de la Langue Française Informatisé, <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm> .
- [TOL, 1998] Tollenaere Michel, « Conception des produits mécaniques : méthodes, modèle et outils », Chap 17, page 413. *Editions HERMES*, Paris 1998.
- [TOV, 2003] Tovey M., Porter S., and Newman R., « Sketching, concept development and automotive design », *Design Studies*, vol. 24, pp. 135-153, 2003.

- [ULL 1988] Ullman, D. G., Dietterich T. G. and Stauffer L. A., « A model of the mechanical design process based on empirical data », *Artificial Intelligence in Engineering Design and Manufacturing* 2(1), p. 33-52, 1988.
- [ULL, 1990] Ullman D., Wood S., Craig D., « The importance of drawing in the Mechanical Design Process », *Computers and graphics*, vol.14, No 2, pp. 263-274, 1990.
- [ULL, 1991] Ullman D. « Design histories: Archiving the evolution of product », *Proceedings of DARPA Workshop on Manufacturing*, Salt Lake City, February 1991.
- [ULL, 1992] Ullman D., « A Taxonomy for Mechanical design », *Research in Engineering Design*, 3 pp. 179-189, 1992.
- [ULL, 1994] Ullman, D. G. « Issues critical to the development of design history, design rationale and design intent », DE-Vol 68, *Design theory and methodology-DTM'94 ASME* 1994, pp 249-258.
- [ULL, 1995] Ullman D., Abmrosio B., « A Taxonomy for Classification Engineering Design Problem and Support Systems », *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis a,d Manufacturing*, 9, pp. 427-438, 1995.
- [VAN 1994] Van Someren M. W., Barnard Y. F. and Sandberh J. A. C., « The think Aloud Method: A Practical Guide to Modelling Cognitive Processes », (Knowledge Based Systems Series), *Academic Press*, San Diego (1994). xii + 208 pp., ISBN 0-12-714270-3.
- [VAR, 1995] Vargas C., « Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Mise en oeuvre basée sur la propagation des contraintes », Thèse de doctorat de l'*Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 1995.
- [VER, 1998] Verstijnen I., Van Leeuwen C., Goldschmidt G., Hamel R., Hennessey J., « Sketching and creative discovery », *Design Studies*, vol.19 No 4, pp. 519-546, 1998.
- [VIS 1993] Visser W., « Collective design: a cognitive analysis of cooperation in practice », *Proc. Int. on Engineering Design ICED93* (Ed. N. Roozenburg), The Hague: Heurista, Zürich 1993.
- [VYG 1986] Vygotsky L., « Thought and language », *MIT Press*, Cambridge, MA, 1986.
- [WER 1963] Werner H., et Kaplan B., « Symbol formation », *Ed. John Willey*, New York, 1963.
- [WHI 1989] Whitefield A. and C. Warren, « A blackboard framework for modelling designers' behaviour », *Design Studies*, 10(3), p. 179-187, 1989.

-
- [WIE, 1996] Wiesel, A. Becker, R. « CAD Model for Performance Evaluation », *Building and Environment*, Vol. 31, N°4, pp. 345-361, 1996.
- [WRI 1991] Wright, P. C. and Monk, A. F. 1991, « A cost-effective evaluation method for use by designer » *International Journal of Man-Machine Studies*, 36, 544-565.
- [XU, 2005] Xu X. W., Galloway R., « Using Behavioral modeling technology to capture designer's intent », *Computer in human Behavior* 21, 2005, pp 395-405.
- [ZEN, 2003] Zeng Y., Pardasani A., Antunes H., Li, Z. Dickinson J., Gupta V., et Baulier D., « Representation an interpretation of sketches in mechanical design: Experimental and theoretical approaches », *Proceeding of DETC'03: ASME 2003 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, Illinois, USA, September 2-6, 2003.

Annexes

Annexe 1 : Document pour les expérimentateurs

Nous présentons ici le document qui était préparé et qui a permis à l'expérimentateur de diriger les expériences. Nous avons en italique les instructions à donner au concepteur. En gris, ce que l'expérimentateur doit faire à chaque étape. Tout est introduit ici de façon brute tel qu'il avait été fait lors de l'expérience. Les explications suivront dans la section 6 de ce chapitre.

Accueil du concepteur

Donner au concepteur le document correspondant à Introduction et le premier exercice d'entraînement. Ce document contient les instructions suivantes :

Nous vous remercions d'avoir accepté de participer à cette séance expérimentale. Prenez place sur cette chaise.

Nous sommes particulièrement intéressés par la compréhension de la conception. Comme nous voulons comprendre vos pensées pendant votre travail de conception, nous vous donnerons un problème de conception que nous vous prions de résoudre en verbalisant vos pensées à haute voix.

Autrement dit, nous vous demandons de verbaliser continuellement vos pensées tout au long de la session. Faites comme si vous vous parlez à vous même, mais assez fort pour être audible dans l'enregistrement. Comportez vous comme si vous étiez seul dans la salle. En fait notre présence n'a pour seul but que de veiller au bon déroulement de l'expérience et pour veiller au bon fonctionnement du matériel. Ne vous occupez donc pas de notre présence. Vous n'avez donc pas besoin d'expliquer, ni de justifier vos pensées. Rationnez de la façon la plus naturelle possible.

La session sera enregistrée en audio/vidéo et analysée plus tard.

Phase 1 : Exercice d'entraînement

Pour vous familiariser avec la méthode de la verbalisation de la pensée, nous allons vous faire faire un exercice d'entraînement de 10 minutes environ. Essayez de résoudre le problème en pensant à haute voix. Ne vous préoccupez pas du fait que vous n'aurez pas résolu le problème après les 10 minutes, car c'est seulement un exercice d'entraînement pour vous familiariser avec la méthode du Concurrent Think Aloud qui sera utilisée pour la session expérimentale.

A cet instant, il faut remettre le problème d'entraînement au concepteur. Ce problème dans l'exercice d'entraînement est présenté en annexe 2 sur la figure A2.1.

Pendant les 10 minutes de l'exercice d'entraînement, il faut rappeler au concepteur de penser à haute voix s'il marque une pause de plus de 30 secondes de silence par

l'instruction « verbalisez ». Il pourra aussi l'interrompre s'il passe à la verbalisation sociale par l'instruction « pas de justification ».

Il y a donc à priori trois instructions possibles : « verbalisez », « pas de justification », et « plus fort ». Si le son de sa voix est très basse, l'interpeller par l'instruction « plus fort ».

L'exercice d'entraînement pourra être renouvelé au besoin avec un autre problème, pour améliorer les aptitudes du concepteur à penser à haute voix.

Quand vous aurez la certitude que le concepteur s'est familiarisé avec la méthode, vous continuerez à la phase suivante.

Phase 2 : Méthode du Concurrent Think Aloud

Donner au concepteur pour lecture le document correspondant contenant les instructions suivantes que vous pourrez aussi les lui lire :

Nous allons maintenant vous faire prendre connaissance avec le problème de conception en vous donnant un cahier des charges écrit pour le produit à concevoir.

Si vous avez besoin d'informations additionnelles, nous vous prions de nous les demander. S'il vous plaît, soyez spécifique dans les questions que vous poserez. Nous ferons tout notre possible pour vous donner des réponses satisfaisantes. A part cela, essayez d'ignorer notre présence dans la salle, surtout pendant vos pensées et réflexions.

Nous vous demanderons de concevoir un modèle CAO du produit à partir de la station de travail CATIA V5 à votre disposition. Vous avez aussi du papier, des stylos, des crayons et des marqueurs pour faire des croquis, des dessins ou des notes. Avant de vous donner le cahier des charges du produit, avez-vous des questions sur la procédure ?

Prendre les questions et fournir des réponses. S'il n'y a plus de questions, remettre le problème de conception aux acteurs (concepteurs).

Vous avez deux heures pour achever votre conception.

Nous vous rappelons que vous devez essayer d'exprimer à haute voix vos pensées et vos réflexions concernant toute votre activité pendant la session, sans toutefois chercher à expliquer quoi que ce soit. Vous devez le faire comme si vous le faisiez pour vous même mais à haute voix de manière à ce qu'il soit enregistré dans de bonnes conditions.

Phase 3 : Débriefing

Après 1 heure de temps ou un peu plus (en fonction de l'avancement du travail), interrompre la séance de travail en ces termes :

Le temps que nous avons prévu pour cette première partie est achevé. Pour atteindre les objectifs de notre recherche, Nous avons prévu qu'un autre concepteur prendra la suite de votre travail. Ne vous souciez donc pas du fait que vous n'avez pas fini avec votre conception. Nous vous invitons à répondre aux questions concernant le déroulement de l'expérience.

Pour chaque question, laisser le concepteur répondre en toute liberté et attendre qu'il ait fini pour passer à la question suivante

- 1) *Que pensez vous de ce sujet ?*
- 2) *Êtes-vous satisfaits du résultat que vous avez réussi à réaliser ?*
- 3) *Quels sont les types d'informations qui étaient particulièrement utiles ?*
- 4) *Qu'avez-vous trouvé en particulier difficile dans le projet ?*
- 5) *Avez-vous vraiment réussi à ignorer notre présence ? Si non, quelle influence notre présence dans la salle avait sur vous ?*
- 6) *Avez-vous été tenté d'expliquer vos idées comme si vous ne l'exprimiez pas pour vous même ?*

Après les réponses aux questions :

Merci, nous vous invitons à prendre quelques minutes de pause. Après cette pause, vous nous expliquerez les intentions que vous avez eues pendant que vous conceviez, en vous servant du modèle CAO que vous avez construit.

A tout à l'heure !

Phase 4 : Méthode de la verbalisation rétrospective de la pensée (RTA)

Donner au concepteur les documents contenant les instructions suivantes. Si possible, les lui lire à haute voix.

Comme nous l'avions déjà souligné, nous faisons à nouveau appel à vous pour une séance rétrospective.

Nous vous invitons maintenant à expliquer les pensées, les idées et les intentions que vous avez eues pendant votre séance de travail.

Vous pouvez vous servir des dessins, des croquis et du modèle CAO du produit que vous avez conçu. Sur ce modèle CAO, nous vous invitons à vous servir éventuellement de l'arbre des spécifications, pour expliquer les raisons de l'existence de chaque entité et si possible des différentes contraintes.

Inviter le concepteur à s'appuyer sur l'arbre de spécifications. Au besoin, poser des questions, pour comprendre.

Quand on se rend compte que le concepteur a tout expliqué, le remercier chaleureusement.

Annexe 2 : Documents pour les concepteurs

Les documents pour les concepteurs sont conçus de façon séparée correspondant à chaque étape du déroulement de l'expérience. Ils sont remis à chaque concepteur au fur et à mesure que l'expérience avance, correspondant aux différentes phases décrites dans le document pour les expérimentateurs (annexe 1). Il y a cinq documents :

Document 1 : Mots d'accueil et instructions préliminaires

Ce premier document contient les instructions en italique présentées à la phase d'accueil du concepteur dans le document expérimentateur.

Document 2 : Exercice d'entraînement

Ce document contient tout d'abord les instructions en italique données à la phase de l'exercice d'entraînement (phase 1) dans le document pour les expérimentateurs. Ces instructions sont suivies du premier problème d'entraînement dont l'énoncé est donné ci-dessous :

Nous vous demandons de concevoir sur CATIA V5 le bouton d'un emporte-pièce dont le dessin de définition est donné ci-dessous (figure 3.13), tout en verbalisant, sans explication ni justification, vos pensées et réflexions tout au long du processus.

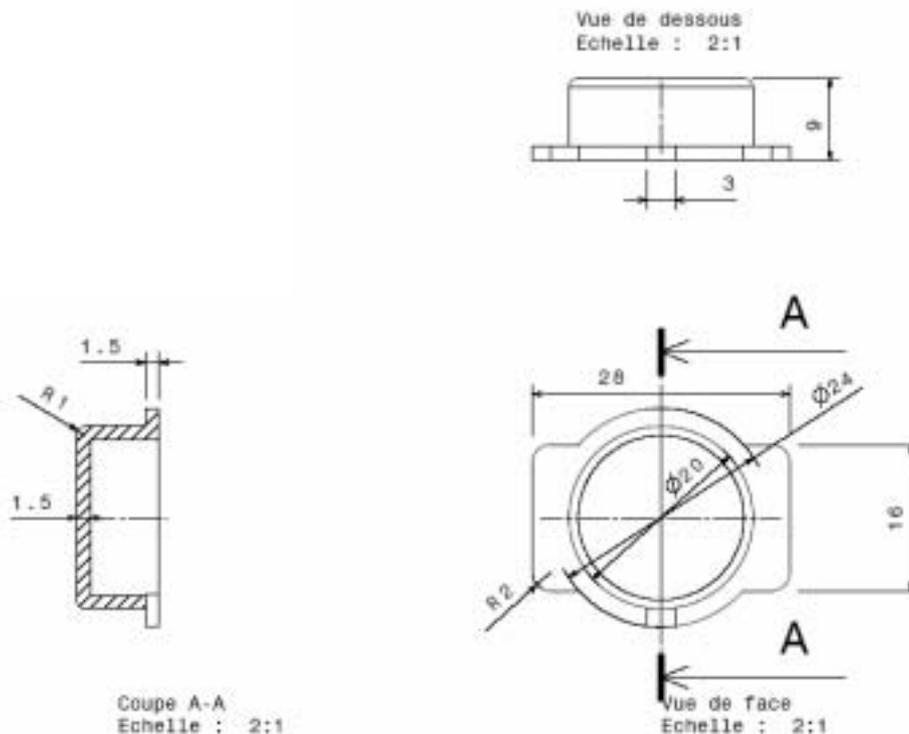


Figure A1 : Problème pour l'exercice d'entraînement

Document 3 : Instructions complémentaires pour le CTA

Le troisième document pour les concepteurs contient des instructions complémentaires, pour le bon déroulement du *Concurrent Think Aloud*, que nous avons déjà présentées en italique dans la phase 2 (Méthode du CTA) du document pour les expérimentateurs.

Document 4 : Problème de conception

Le quatrième document contient le libellé du problème de conception tel que présenté dans la section 4.1 de ce chapitre.

Document 5 : Instructions pour la méthode de la verbalisation rétrospective de la pensée

Ce cinquième document contient les instructions déjà présentées en italique dans la phase 4 du document pour les expérimentateurs.

Annexe 3 : Correspondance des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation et vice versa

Activités	Regard passif (R)	Navigation (N)	Construction (Cs)	TOTAL
1^{ère} partie : Correspondance en terme des nombres de segments				
O	127	118	24	269
Ic	45	26	101	172
Rc	41	52	43	136
Ir	55	88	131	274
Rr	37	36	34	107
Pauses	94	108	135	337
TOTAL	399	428	468	1295
2^{ème} Partie : Correspondance en terme de pourcentage des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation				
O	47%	44%	9%	100%
Ic	26%	15%	59%	100%
Rc	30%	38%	32%	100%
Ir	20%	32%	48%	100%
Rr	34%	34%	32%	100%
Pauses	28%	32%	40%	100%
3^{ème} Partie : Correspondance en terme de pourcentage des activités issues de la verbalisation dans les activités issues de la vidéo				
Observation	32%	28%	5%	
Ic	11%	6%	22%	
Rc	10%	12%	9%	
Ir	14%	21%	28%	
Rr	9%	8%	7%	
Pauses	24%	25%	29%	
TOTAL	100%	100%	100%	

Tableau A3.1 : Correspondance des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation et vice versa (concepteur 2)

Activités	Regard passif (R)	Navigation (N)	Construction (Cs)	TOTAL
1^{ère} partie : Correspondance en terme des nombres de segments				
O	169	148	27	344
Ic	46	28	91	165
Rc	32	44	39	115
Ir	59	87	135	281
Rr	46	50	39	135
Pauses	87	87	137	311
TOTAL	439	444	468	1351
2^{ème} Partie : Correspondance en terme de pourcentage des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation				
O	49%	43%	8%	100%
Ic	28%	17%	55%	100%
Rc	28%	38%	34%	100%
Ir	21%	31%	48%	100%
Rr	34%	37%	29%	100%
Pauses	28%	28%	44%	100%
3^{ème} Partie : Correspondance en terme de pourcentage des activités issues de la verbalisation dans les activités issues de la vidéo				
Observation	38%	33%	6%	
Ic	11%	6%	20%	
Rc	7%	10%	8%	
Ir	13%	20%	29%	
Rr	11%	11%	8%	
Pauses	20%	20%	29%	
TOTAL	100%	100%	100%	

Tableau A3.2 : Correspondance des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation et vice versa (concepteur 3)

Activités	Regard passif (R)	Navigation (N)	Construction (Cs)	TOTAL
1^{ère} partie : Correspondance en terme des nombres de segments				
O	130	125	16	271
Ic	45	30	92	167
Rc	43	61	51	155
Ir	51	90	101	242
Rr	61	59	49	169
Pauses	84	97	154	335
TOTAL	414	462	463	1339
2^{ème} Partie : Correspondance en terme de pourcentage des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation				
O	48%	46%	6%	100%
Ic	27%	18%	55%	100%
Rc	28%	39%	33%	100%
Ir	21%	37%	42%	100%
Rr	36%	35%	29%	100%
Pauses	25%	29%	46%	100%
3^{ème} Partie : Correspondance en terme de pourcentage des activités issues de la verbalisation dans les activités issues de la vidéo				
Observation	32%	27%	3%	
Ic	11%	7%	20%	
Rc	10%	13%	11%	
Ir	12%	19%	22%	
Rr	15%	13%	11%	
Pauses	20%	21%	33%	
TOTAL	100%	100%	100%	

Tableau A3.3 : Correspondance des activités issues de la vidéo dans les activités issues de la verbalisation et vice versa (concepteur 4)

Annexe 4 : Découpage des modèles CAO en pièces

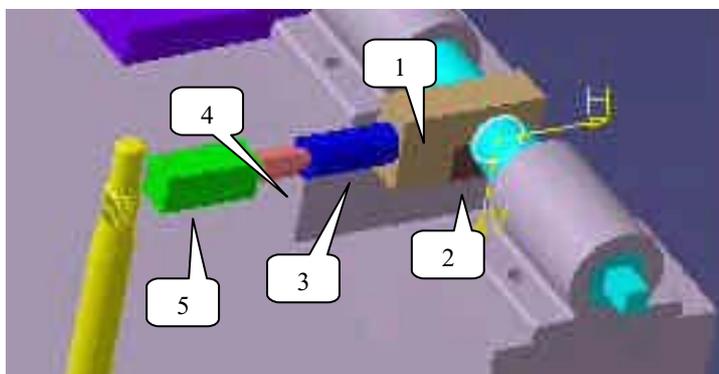


Figure A4.1 : Pièces du modèle CAO du sous-système conçu par le concepteur 2

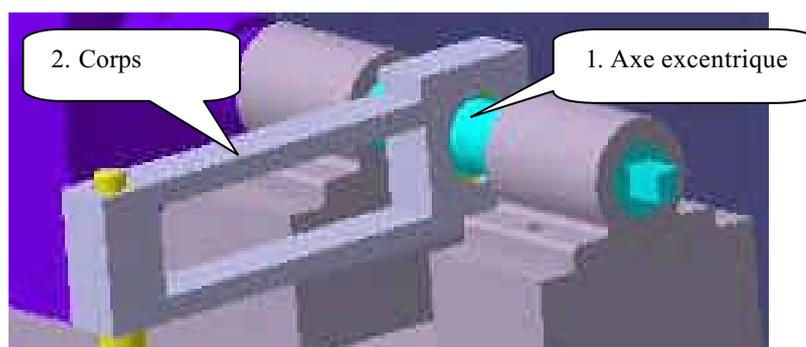


Figure A4.2 : Pièces du modèle CAO du sous-système conçu par le concepteur 3

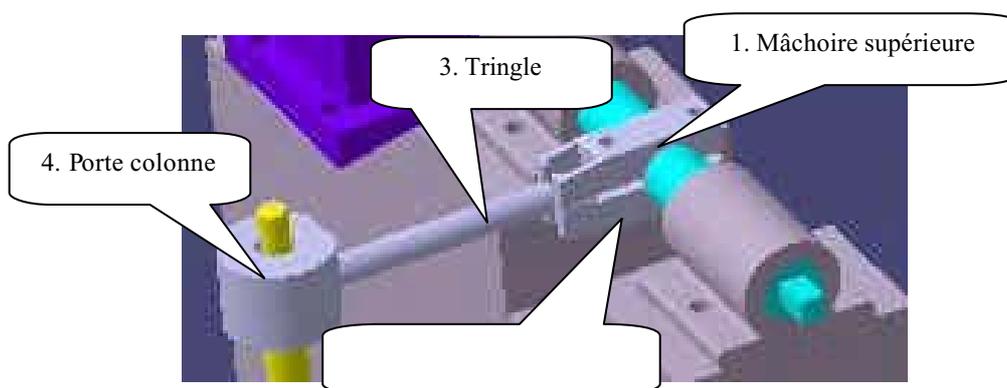


Figure A4.3 : Pièces du modèle CAO du sous-système conçu par le concepteur 4

Annexe 5 : Nombre de segments d'éléments de la partie conception par domaine de travail

Nous avons comptabilisé les différentes activités de la partie conception par domaine de travail. Les résultats en terme de nombre de segments d'activités pour chaque type de protocole sont présentés dans les tableaux suivants pour les concepteurs 2 à 4

Domaine de travail	PC	D	CAO					Mcao	Total
			1	2	3	4	5		
CTA	45	42	41	30	32	39	30	42	301
RTA	4	2	22	13	13	14	15	13	96

Tableau 5.1 : Nombre de segments d'éléments de conception filtrés par domaine de travail dans le CTA et dans le RTA du concepteur 2

Domaine de travail	PC	D	CAO			Total
			1	2	Mcao	
CTA	48	41	157	48	23	317
RTA	3	2	56	16	20	97

Tableau 5.2 : Nombre de segments d'éléments de conception filtrés par domaine de travail dans le CTA et dans le RTA du concepteur 3

Domaine de travail	PC	D	CAO				Mcao	Total
			1	2	3	4		
CTA	36	43	95	2	75	48	7	306
RTA	3	3	41	1	19	17	4	88

Tableau 5.3 : Nombre de segments d'éléments de conception filtrés par domaine de travail dans le CTA et dans le RTA du concepteur 4

Annexe 6 : Type d'éléments de la partie conception dans les protocoles.

Les segments initialement codés par Pc sont ensuite comptabilisés et les résultats pour le concepteur 2 à 4 sont présentés dans les tableaux et figures ci-dessous.

	Fo	St	Di	Ma	Fa	Re	Mt	Et	Total
CTA	51	106	120	9	6	3	3	3	301
RTA	23	42	13	8	6	2	1	1	96

Tableau A6.1 : Segments intentionnels par type d'éléments de conception dans le CTA et le RTA du concepteur 2

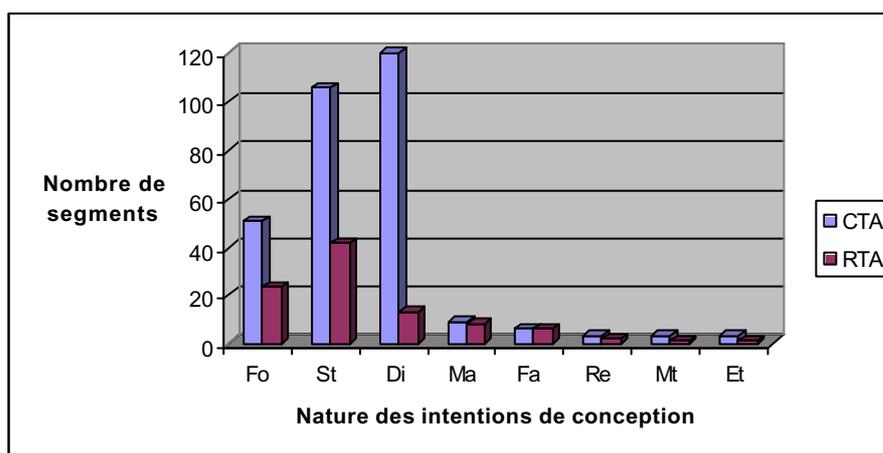


Figure A6.1 : Histogramme de comparaison du CTA et du RTA en terme de la qualité des intentions de conception dans les protocoles du concepteur 2

	Fo	St	Di	Ma	Fa	Re	Mt	Et	Total
CTA	44	114	123	10	16	10	0	0	317
RTA	24	44	15	4	7	3	0	0	97

Tableau A6.2 : Segments intentionnels par type d'éléments de conception dans le CTA et le RTA du concepteur 3

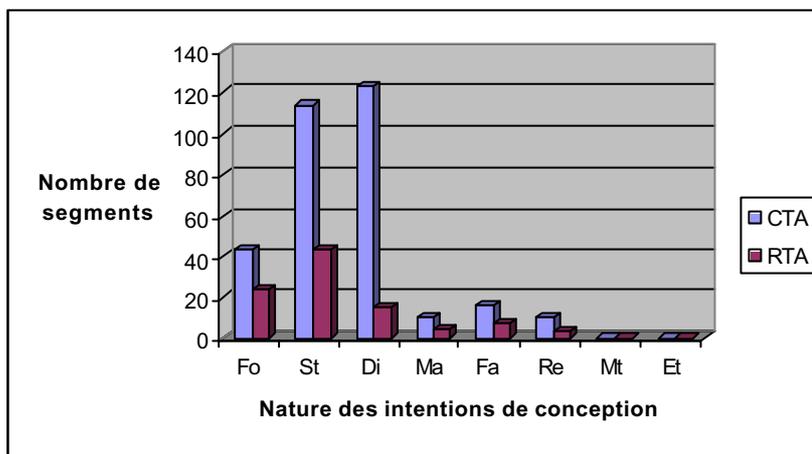


Figure A6.2 : Histogramme de comparaison du CTA et du RTA en terme de la qualité des intentions de conception dans les protocoles du concepteur 3

	Fo	St	Di	Ma	Fa	Re	Mt	Et	Total
CTA	46	104	122	12	13	3	0	6	306
RTA	19	44	11	4	3	3	0	4	88

Tableau A6.3 : Segments intentionnels par type d'éléments de conception dans le CTA et le RTA du concepteur 4

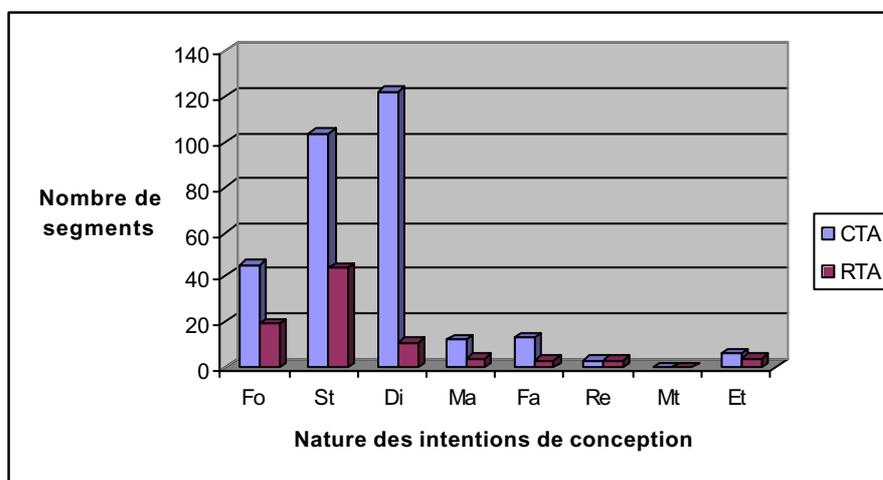


Figure A6.3 : Histogramme de comparaison du CTA et du RTA en terme de la qualité des intentions de conception dans les protocoles du concepteur 4

Annexe 7 : segments intentionnels par types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail

	PC		E		CAO										Total			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Fo	16	3	17	0	2	7	1	4	1	1	2	2	1	0	11	6	51	24
St	24	1	23	2	13	9	9	5	11	6	12	8	9	6	5	5	106	47
Di	0	0	0	0	16	3	18	3	20	4	25	2	20	1	21	0	120	17
Ma	2	0	0	0	3	1	1	0	0	1	0	2	0	3	3	1	9	7
Fa	2	0	2	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	3	0	0	6	5
Re	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	2
Mt	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
Et	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3	1
Total	45	4	42	2	41	22	30	13	32	13	25	14	30	15	42	13	301	96

□ = CTA ■ = RTA

Tableau A7.1 : Segments intentionnels par types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail du concepteur 2

	PC		E		CAO						Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fo	17	2	14	1	7	8	4	6	2	7	44	24
St	25	1	27	1	31	21	16	10	15	10	114	44
Di	0	0	0	0	95	15	22	0	6	0	123	15
Ma	3	0	0	0	5	3	2	0	0	1	10	4
Fa	2	0	0	0	12	6	2	0	0	1	16	7
Re	1	0	0	0	7	2	2	0	0	1	10	3
Mt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Et	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	48	3	41	2	157	56	48	16	23	20	317	97

□ = CTA ■ = RTA

Tableau 7.2 : Segments intentionnels par types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail du concepteur 3

	PC		E		CAO										Total	
					1		2		3		4		Mcao			
Fo	12	2	16	1	6	8	0	0	5	4	3	2	4	2	46	19
St	20	2	25	1	29	21	2	1	15	9	13	10	0	0	104	44
Di	0	0	0	0	50	6	0	0	42	3	30	2	0	0	122	11
Ma	2	0	1	0	4	2	0	0	4	1	1	1	0	0	12	4
Fa	1	0	1	0	4	1	0	0	6	1	1	1	0	0	13	3
Re	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	1	0	0	3	3
Mt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Et	0	0	0	0	2	2	0	0	1	0	0	0	3	2	6	4
Total	36	4	43	2	95	41	2	1	75	19	48	17	7	4	306	88

□ = CTA

■ = RTA

Tableau A7.3 : Segments intentionnels par types d'éléments de la conception dans chaque domaine de travail du concepteur 4

Résumé de la thèse

La capitalisation de la conception devient un enjeu pour le travail collaboratif dès lors que celui-ci comporte des épisodes individuels. Elle passe par la conservation des traces des raisonnements et intentions de conception. A cet effet, le concepteur individuel a besoin d'être assisté par un système que nous avons appelé « système d'intentions de conception ». L'idéal d'un tel système a été virtuellement subdivisé en modules et chaque module a été décrit. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux systèmes CAO, qui présentent, de nos jours, une « suprématie apparente » en conception des produits mécaniques. Il s'agissait, dans un premier temps, d'interroger d'éventuels manques de ces outils. Pour y arriver, nous avons alors entrepris d'analyser une séquence de conception à l'aide d'outils CAO. Nous avons adopté la méthode expérimentale, notamment celle du *protocol analysis*, ou le concepteur travaille et verbalise ses pensées au cours de la conception (*Concurrent Think Aloud* ou CTA) ou après (*Retrospective Think Aloud* ou RTA). Quatre expériences de conception ont été ainsi réalisées, sur le même problème de conception, avec la participation de quatre concepteurs différents.

L'analyse du CTA nous a permis de mieux comprendre la conception à l'aide d'outil CAO et de proposer un modèle d'activités. Ce modèle comporte cinq éléments (observation, formalisation des intentions de conception, raisonnement de conception, formalisation des intentions de représentation, raisonnement pour la représentation), détecté à l'aide des paroles du concepteur et un élément (action) détecté par l'enregistrement vidéo et regroupant les gestes du concepteur. De plus, Les liens entre les cinq premiers éléments sont présents dans le modèle.

Nous avons ensuite analysé le RTA dans le but de faire une comparaison avec le CTA. Cette comparaison nous a permis de détecter quelques insuffisances de l'outil CAO, utilisé dans la représentation des intentions de conception. Pour contribuer à pallier à ces insuffisances, nous avons proposé un cadre, qui pourra permettre d'attacher les intentions de conception au modèle CAO du produit. Ainsi, plusieurs des modules d'un système idéal d'intentions de conception se trouveront améliorés au sein des systèmes CAO actuels.

Mots clés : analyse des protocoles, intentions de conception, représentation de la conception, modèle CAO