

Numéro d'ordre : 066

Année 2007

Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques, Université de Technologie de
Belfort-Montbéliard et Université de Besançon
Université de Pitești, Roumanie

THESE en co-tutelle

Présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-
MONTBELIARD ET DE L'UNIVERSITE DE BESANÇON**

Spécialité : SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Contribution à l'analyse des itérations dans le processus de conception : proposition d'indicateurs d'évaluation de performances

Par

Daniel-Constantin ANGHEL

Soutenue le 29 mai 2007 devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Emmanuel CAILLAUD, Professeur, IPST, Université Louis Pasteur, Strasbourg

Gabriel RIS, Professeur, ESIAL, Université Henri Poincaré, Vandoeuvre-lès-Nancy

Examineurs :

Michel FERNEY, Professeur, UTBM

Olivier GARRO, Professeur, UTBM, Directeur de thèse

Ion UNGUREANU, Professeur, Université de Pitești (Roumanie), Directeur de thèse

Toufik BOUDOUH, Maître de Conférences, UTBM, Co-directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. le Professeur Olivier GARRO, M. le Professeur Ion UNGUREANU et M. Toufik BOUDOUH, Maître de Conférences, avec lesquels j'ai eu le très grand plaisir de travailler tout au long de cette thèse. Je leur adresse ma gratitude pour l'attention, les conseils, les encouragements, la patience, l'amabilité dont ils ont fait preuve tout au long de mes travaux.

J'exprime ma reconnaissance à M. le Professeur Michel FERNEY et à Mme. le Professeur Marioara ABRUDEANU pour leur apport et leur soutien tout au long de cette thèse en cotutelle.

Je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont montré à ce travail :

- FERNEY Michel, Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
- CAILLAUD Emmanuel, Professeur, IPST, Université Louis Pasteur, 67100 Strasbourg
- RIS Gabriel, Professeur, ESIAL, Université Henri Poincaré, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy
- GARRO Olivier, Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
- UNGUREANU Ion, Professeur, Université de Pitești, 0300 Pitești (Roumanie)
- BOUDOUH Toufik, Maître de Conférences, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Je tien à remercier très vivement mes collègues, présents et passés du Laboratoire M3M (Eugeniu DECIU, Nicolae BRÎNZEI, Corneliu SLAVILA, Daniel SCHLEGEL, Christophe BOZON, Reza MOVAHEDKHAH, Gilbert KUATE, Vicky ROUSS, Abdel-Hakim HORRIGUE, Arnaud BONARGENT, Pascale MINARRO, Idriss YACOUB, Wolfgang NZIE), mes collègues de l'Université de Pitești, mes amis et ainsi que mes proches.

Mes remerciements vont également à M. Christophe DECREUSE, Maître de Conférences, à M. Denis CHOULIER, Maître de Conférences, à M. Philippe LESAGE et à M. Pascal ALDINGER pour leur aide.

Les plus sincères remerciements s'adressent aussi pour Mme. Béatrice ROSSEZ pour toute sa bonne humeur et aussi pour son soutien dans la dernière partie de ce travail.

Je ne saurais finir sans remercier ma tendre fiancée Roxana, pour toute sa patience et pour tout son soutien qu'elle m'a apporté.

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE	1
1 LE PROCESSUS DE CONCEPTION DANS LE CONTEXTE DE L'INGENIERIE SIMULTANEE	6
1.1 Introduction	6
1.2 Points de vue sur la conception	6
1.2.1 Classification des problèmes de conception	7
1.2.1.1 Conception routinière	8
1.2.1.2 Conception innovante	8
1.2.1.3 Conception créative	8
1.2.2 Modes de travail en conception (synchrone/asynchrone, à distance/en présentiel)	8
1.2.3 Importance économique (coûts, délais, ...)	9
1.2.3.1 Importance de la durée des études de conception	9
1.2.3.2 Influence de la conception sur les coûts de production	9
1.2.4 Evolutions techniques / management (CE)	11
1.2.4.1 Evolutions techniques	11
1.2.4.1.1 De la planche à dessin à la CAO	11
1.2.4.1.2 De la CAO à la maquette numérique	11
1.2.4.1.3 De la maquette numérique au PLM	12
1.2.4.2 Evolutions au niveau de l'organisation	12
1.2.4.2.1 Du séquentiel vers le simultané	12
1.2.4.2.2 L'Ingénierie Séquentielle	12
1.2.4.2.3 L'ingénierie simultanée	13
1.2.4.2.4 Les principes de mise en œuvre de l'ingénierie simultanée	13
1.3 Des modèles pour des démarches de conception	14
1.3.1 Les modèles prescriptifs	14
1.3.2 Les modèles descriptifs	14
1.3.3 Exemples de modèle du processus de conception	15
1.3.3.1 Le modèle de Pahl et Beitz	15
1.3.3.2 Le modèle de Roozenburg et Eekels	16
1.3.3.3 Le modèle FBS	17
1.4 Les itérations : un risque accentué par l'Ingénierie Simultanée	18
1.5 Positionnement de nos travaux	21
1.5.1 Types de problèmes de conception	21
1.5.2 Modes de travail des concepteurs	21
1.5.3 Ingénierie séquentielle / simultanée	21
1.5.4 Démarche de modélisation	21
1.6 Conclusions	21
2 PROBLEMATIQUE ABORDEE DANS LA THESE	24

2.1	Introduction.....	24
2.2	Critères et indicateurs de performance du Processus de Conception.....	24
2.2.1	Les critères de performance	24
2.2.2	Les indicateurs de performance du Processus de Conception.....	25
2.3	Problèmes affectant les performances du processus de conception	25
2.3.1	Aspect organisationnel.....	26
2.3.2	Aspect opérationnel.....	26
2.3.3	Aspect informationnel.....	27
2.4	Synthèse et exemples d'indicateurs de performance	29
2.5	Conclusions.....	30
3	LES ITERATIONS DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION.....	32
3.1	Introduction.....	32
3.2	L'activité de conception.....	32
3.3	Modèle de représentation de l'activité de conception.....	33
3.4	Les types des liens entre les activités de conception.....	34
3.5	Les itérations en conception	36
3.5.1	Définition des itérations	36
3.5.2	Les sources d'itérations.....	38
3.5.2.1	Le changement d'objectifs	38
3.5.2.2	Les erreurs de conception.....	38
3.5.2.3	L'interdépendance entre activités.....	38
3.6	Typologie d'itérations	38
3.6.1	Les itérations Courtes / Longues.....	38
3.6.2	Les itérations Volontaires / Involontaires	38
3.6.3	Les itérations Constructives / Exploratoires.....	39
3.6.4	Les itérations Rapides / Lentes	39
3.7	Modélisation des itérations en conception : Etat de l'art	39
3.7.1	La méthode DSM.....	39
3.7.2	Autres modèles.....	41
3.7.2.1	Modèles basés sur la méthode DSM	41
3.7.2.2	Modèles basés sur la simulation.....	43
3.7.3	L'Algorithme de diagonalisation de la matrice DSM	44
3.8	Conclusions.....	51
4	L'UTILISATION DE L'EXPERIMENTATION EN CONCEPTION..	54
4.1	Introduction.....	54
4.2	Démarche générale de recherche.....	54
4.2.1	Design Research Methodology	54

4.2.2	Cycle de recherche CID	55
4.3	La démarche de recherche utilisée dans ce travail.....	56
4.4	Description des expériences de conception étudiées.....	57
4.4.1	Première expérience étudiée	57
4.4.2	Deuxième expérience étudiée	59
4.4.3	Troisième expérience étudiée.....	61
4.5	L'observation et le recueil de données des expériences de conception.....	63
4.5.1	Le rôle de l'observation	63
4.5.2	Les limites de l'observation	63
4.6	Conclusions	64
5	ANALYSE DES EXPERIENCES DE CONCEPTION	66
5.1	Introduction	66
5.2	Itérations et niveaux de décomposition du processus de conception.....	66
5.3	Méthodes d'analyse des expériences de conception	67
5.3.1	Analyse des actes de conception.....	67
5.3.1.1	Les actes de langage	69
5.3.1.2	Les actes de dialogue.....	70
5.3.1.3	Itérations liées aux actes de conception.....	71
5.3.1.3.1	Les buts différents.....	71
5.3.1.3.2	La divergence des dialogues dans une négociation	71
5.3.1.3.3	Le niveau de satisfaction d'un compromis	71
5.3.2	L'analyse par le modèle FBS.....	71
5.3.3	L'analyse des objets intermédiaires	73
5.3.3.1	L'émergence des objets intermédiaires et la dynamique des connaissances	74
5.3.3.2	Type de dépendances entre les objets intermédiaires	75
5.3.3.3	Représentation matricielle des dépendances entre les objets intermédiaires	77
5.3.4	Analyse des interactions entre les participants à la conception	78
5.3.5	Analyse fonctionnelle du produit.....	80
5.4	Identification des itérations sur les expériences étudiées	83
5.4.1	L'identification des itérations sur la première expérience	83
5.4.2	L'identification des itérations sur la deuxième expérience.....	85
5.4.3	L'identification des itérations sur la troisième expérience	90
5.5	Conclusions	91
6	APPROCHE D'EVALUATION DES PERFORMANCES DU PROCESSUS DE CONCEPTION	94
6.1	Introduction	94
6.2	Performances et indicateurs de performance du processus de conception.....	94
6.3	Approche de développement des indicateurs de résultat	95
6.3.1	Indicateur d'itérations	95
6.3.2	Indicateur de changement d'objectifs	96

6.3.3	Indicateur d'interdépendance entre les activités	96
6.3.4	Indicateur d'erreurs de conception.....	97
6.3.5	Indicateur d'intentionnalité	97
6.3.6	Indicateur d'apport (+/-).....	98
6.3.7	Indicateur d'étape.....	98
6.3.8	Indicateur typologie - sources	100
6.3.9	Indicateur sources – typologie	101
6.3.10	Indicateur typologie – typologie	102
6.4	Approche de développement des indicateurs de processus.....	102
6.4.1	Indicateur de solutions proposées	103
6.4.2	Indicateur de solutions abandonnées.....	105
6.4.3	Indicateurs d'itérations réalisées à cause de désaccords	106
6.4.3.1	Taux du temps passé en itérations pour solutionner les désaccords.....	107
6.4.3.2	L'impact de chaque type d'interaction génératrice de conflits.....	107
6.4.4	Indicateur type d'interaction – type d'objets intermédiaires – dialogues	109
6.4.5	Les OIs parent produits par chaque participant entre deux revues projet	110
6.4.6	Taux d'itérations réalisées par chaque acteur	110
6.4.7	Type d'interaction/nombre d'itérations.....	111
6.5	Conclusions.....	111
	CONCLUSION GENERALE.....	115
	PERSPECTIVIES	117
	BIBLIOGRAPHIE.....	119
	ANNEXES	131

Table des Figures

Figure 1- La conception selon les axes : espace-temps.....	8
Figure 2- Conception et coût du produit.....	10
Figure 3- Influence des phases de conception sur la possibilité de réduction des coûts.....	10
Figure 4- Le rôle stratégique des premières phases de conception.....	11
Figure 5- Le modèle de <i>Pahl</i> et <i>Beitz</i>	15
Figure 6- Cycle élémentaire de conception selon <i>Roozenburg</i> et <i>Eekels</i> [ROOZ 95]	16
Figure 7- La structure itérative du processus de conception [ROOZ 95]	17
Figure 8- Le modèle FBS par <i>Gero</i> [GERO 90]	18
Figure 9- Echanges d'informations dans un processus de conception en Ingénierie Simultanée.....	19
Figure 10- Durée et coût de cycle sans perturbation	20
Figure 11- Durée et coût de cycle avec perturbation	20
Figure 12- Le flux d'information entre les étapes du processus de conception [AFNO 04]	26
Figure 13- Itérations et construction de connaissances.....	27
Figure 14- Des activités couplées.....	28
Figure 15- L'exécution d'activités couplées.....	28
Figure 16- Notion d'activité.....	32
Figure 17- Module d'une activité de conception	33
Figure 18- Concept générique de modélisation d'activité [MEGA 99].....	34
Figure 19- Les types d'activités en fonction de leurs dépendances	35
Figure 20- Les différents schémas d'exécution des activités.....	36
Figure 21- Exemple d'activités itératives	37
Figure 22- Exemple d'une matrice DSM.....	40
Figure 23- Représentation DSM de liens entre activités [Smith 92]	40
Figure 24- Matrice DSM réarrangée	41
Figure 25- Une matrice Modules-Activités.....	42
Figure 26- Activités du modèle RAIH.....	43
Figure 27- Exemple du processus de conception.....	44
Figure 28- La représentation DSM du processus de conception	45
Figure 29- Les cycles dans la matrice DSM.....	50
Figure 30- La matrice DSM réarrangée en forme finale.....	50
Figure 31- Représentation des niveaux de précédence	50
Figure 32- Ordonnancement des activités par les niveaux de précédence	51
Figure 33- Design Research Methodology [BLES 01].....	55
Figure 34- Cycle de recherche CID [CHOU 04].....	55
Figure 35- La démarche de conception utilisée dans ce travail	56
Figure 36- Environnement de l'expérience	59
Figure 37- Le dessin de la pièce	59
Figure 38- L'écran du poste de travail.....	61
Figure 39- Exemple d'une remorque de VTT.....	62
Figure 40- L'expérience de conception à distance.....	62
Figure 41- Les écrans des quatre postes de travail	63
Figure 42- Evolution du produit, du « fonctionnel » vers le « structurel ».....	66
Figure 43- Itérations et degré de décomposition du processus de conception.....	67
Figure 44- Les actes de conception, selon GRACC [GRAC 02]	68
Figure 45- Réalisation d'un acte de langage entre l'émetteur et le récepteur.....	69
Figure 46- Les actions des acteurs dans un acte de dialogue	70
Figure 47- La satisfaction du but	71

Figure 48- Le modèle FBS enrichi	72
Figure 49- Le codage FBS enrichi des actes de conception	72
Figure 50- Les actes de conception selon le modèle FBS.....	73
Figure 51- Types d'Objets Intermédiaires en conception [GARR 95].	74
Figure 52- Construction des connaissances utilisant des OIs	75
Figure 53- Les différents types de dépendances entre les objets intermédiaires	76
Figure 54- Les OIs parent, les OIs dépendants et les OIs indépendants.....	76
Figure 55- La représentation matricielle des dépendances entre les OIs	77
Figure 56- La représentation DSM de la matrice M_{OI}	77
Figure 57- Identification des cycles séparables des OIs dans la matrice DSM.....	78
Figure 58- Les interactions possibles entre les participants à la conception.....	79
Figure 59- Le type d'interactions pendant le déroulement du processus de conception	79
Figure 60- La représentation matricielle des interactions entre les participants à la conception	79
Figure 61- Les trois parties du produit	80
Figure 62- Les fonctions de service pour le produit « Remorque VTT pour enfant».....	81
Figure 63- Couplage fonction/tâche.....	82
Figure 64- Le déroulement de la première expérience représentée par les actes de conception	83
Figure 65- Codification des actes de conception selon GARRO [GARR 01].....	83
Figure 66- Recherche de solutions et premiers objets intermédiaires.....	84
Figure 67- Objets intermédiaires des solutions retenues	84
Figure 68- Conception détaillée et chiffrage de la solution retenue.....	85
Figure 69- Représentation matricielle des liens entre les tâches de conception pour la deuxième expérience	85
Figure 70- Codification des liens entre les tâches en fonction du degré de chevauchement	86
Figure 71- Matrice DSM réordonnée.....	86
Figure 72- Extrait de la base de données (deuxième expérience).....	87
Figure 73- Modifications réalisées à cause du changement d'une solution partielle pour le système de fixation.....	88
Figure 74- Le diagramme de GANTT du processus de la 2 ^{ème} expérience.....	89
Figure 75- Identification des itérations entre les tâches sur le diagramme de GANTT.....	89
Figure 76- Le diagramme du GANTT du processus	90
Figure 77- La matrice DSM du processus.....	91
Figure 78- La démarche proposée pour évaluer les performances du processus de conception.....	95
Figure 79- Les étapes d'avancement du processus de conception	99
Figure 80- Les temps passés en itération par chaque étape de conception.....	100
Figure 81- La représentation graphique typologie - sources	101
Figure 82- Représentation graphique des sources - typologie.....	101
Figure 83- Représentation graphique typologie – typologie.....	102
Figure 84- Les solutions proposées pour chaque problème de conception, entre deux revues projet	103
Figure 85- Les solutions abandonnées entre deux revues projets	105
Figure 86- Evolution du taux des solutions abandonnées en temps.....	106
Figure 87- La matrice d'impact des interactions sur la durée du processus de conception.....	108
Figure 88- Les OIs parent produits.....	110
Figure 89- Nombre d'itérations par type d'interaction	111
Figure 90- Démarche de recherche adoptée.....	116
Figure 91- La maquette graphique de l'outil d'aide au pilotage du processus de conception	118
Figure 92- Exemple d'une matrice WTM	131
Figure 93- Modèle DSM séquentielle itératif.....	133
Figure 94- La matrice 3X3 d'un processus de conception	133
Figure 95- La chaîne de Markov A-B-C.....	133

Figure 96- Les ordonnancements possibles des activités	136
Figure 97- Le principe de mise en parallèle des blocs ou des tâches de conception.....	137
Figure 98- La mise en parallèle de deux tâches du deuxième bloc avec la première tâche du premier bloc.....	138
Figure 99- La mise en parallèle d'une tâche du deuxième bloc avec la deuxième tâche du premier bloc.....	139
Figure 100- Le schéma logique d'algorithme de mise en parallèle des tâches de conception.....	140
Figure 101- La matrice DSM des dépendances entre les tâches de conception	141
Figure 102- La matrice DSM réarrangée, avec les blocs séparables.....	141
Figure 103- Le diagramme de GANTT du processus réel.....	142
Figure 104- Le diagramme de GANTT du processus simulé.....	142

INTRODUCTION GENERALE

Durant les deux dernières décennies, le management du processus de conception a beaucoup évolué avec l'apparition des concepts d'**ingénierie intégrée** ou de **concurrent engineering**. En effet, le processus de conception est devenu une source de compétitivité pour les industries manufacturières, car de lui dépendra, notamment, le délai de mise sur le marché des produits, leur qualité et leur coût.

Ainsi, le contexte dans lequel se trouve la conception des produits devient, aujourd'hui, de plus en plus complexe. D'une part, les connaissances et les savoirs augmentent sans cesse, offrant aux concepteurs de nouvelles voies de résolution et de nouvelles solutions, aussi, les techniques et les outils mis à leur disposition sont devenus de plus en plus performants et complexes et, d'autre part, les exigences des utilisateurs et les contraintes du marché deviennent de plus en plus sévères.

Un aspect important est l'orientation actuelle des entreprises vers **la conception à distance**. Cette manière de travail est possible grâce aux outils de communication en temps réel entre plusieurs sites de conception et aussi grâce aux outils de calcul et de représentation qui permettent aux participants d'intervenir à tout moment pour exprimer leurs idées et pour corriger ou développer les solutions existantes. Un des inconvénients de la conception à distance est que les participants dépendent de ces outils et de leurs performances. Ils doivent savoir bien maîtriser ces outils pour arriver à mieux s'exprimer. Pour cela, ils doivent utiliser un certain langage pour communiquer : une ou plusieurs langues connues par tous les participants pour parler entre eux et des langages informatiques, pour communiquer avec les outils numériques employés. Aussi, ils doivent respecter un protocole de travail strict : une hiérarchie d'intervention dans la communication, un certain rôle par rapport aux autres participants, etc. En réalité, une communication sans perturbations n'est pas possible. Les perturbations peuvent être générées par un mauvais emploi des outils de communication, par des erreurs d'interprétation, par des décalages entre les interventions, ou encore par des interventions tardives, etc. Pour diminuer ou éliminer l'effet de ces perturbations sur le déroulement du processus de conception, il est souvent nécessaire de réaliser un certain nombre d'**itérations** lors de l'exécution des tâches de conception. Mais, la présence des itérations dans le processus de conception a aussi des effets secondaires, surtout au niveau des coûts et des délais.

Un autre aspect de l'évolution de la conception, très répandu aujourd'hui, est celui de l'utilisation des **équipes multidisciplinaires** dans les projets de développement de produit. Ce type d'équipe est devenu nécessaire car il permet d'avoir une diversité des connaissances, sur plusieurs domaines, ce qui augmente aussi la créativité. Cependant, cette nouvelle organisation du travail oblige les acteurs du projet à communiquer, à échanger des informations avec des partenaires de cultures et de métiers différents. Les risques associés à cette approche, liés à la communication entre les divers métiers [HA 95] [LOCH 98], peuvent conduire à l'augmentation des coûts et des délais [AITS 95].

Les fluctuations au niveau du marché et la tendance actuelle de mondialiser les entreprises (l'élargissement de l'équipe de concepteurs, de nouvelles catégories d'utilisateurs, de nouvelles contraintes économiques et juridiques, etc.) introduisent des changements sur certains paramètres du processus de conception. Les changements peuvent avoir aussi des causes internes, comme les changements des concepts ou des solutions partielles. Tous ces changements ont un effet sur le déroulement du processus de conception. Il est important, pour ce dernier, d'être capable de réagir vite aux changements et de retrouver à un état optimal de déroulement. La réaction aux changements va se présenter sous forme d'itérations des tâches de conception. Les itérations sont, donc, l'une des caractéristiques du processus de conception qui influencent directement ses performances. Leur analyse est un facteur clé pour la compression des délais et des coûts de développement de produits.

Certaines itérations – volontaires – peuvent être prévues et intégrées dès la planification du processus de conception. Par contre, nombreuses sont celles – involontaires – qui apparaissent dans la conception des produits sans qu’elles aient été prévues.

A partir de ces considérations, nous posons la problématique suivante :

« Comment pouvons-nous évaluer les performances d’un Processus de Conception réalisé dans un contexte d’Ingénierie Simultanée et soumis à des changements et des perturbations ? »

Face à cette problématique, nous allons émettre l’hypothèse suivante :

« L’analyse des itérations des tâches de conception permet d’évaluer les performances du Processus de Conception ».

L’étude menée dans cette thèse consiste alors à développer des méthodes d’observation, de modélisation et de traitement pour mettre en évidence ces itérations et leur impact, puis en réduire les conséquences.

Pour développer ce travail de thèse, nous avons réalisé des études bibliographiques et aussi des études sur des expériences de conception. Les études bibliographiques ont eu comme principal but de définir le contexte actuel de la conception, de mettre en évidence ses points faibles, surtout au niveau des itérations, et de faire une analyse sur les méthodes existantes pour leur traitement. Ces études ont permis de réaliser une typologie des itérations et aussi d’identifier certaines sources d’itérations.

Les études sur des expériences de conception ont été réalisées pour enrichir les connaissances existantes concernant les itérations. Ainsi, nous avons quantifié, pour ces expériences, l’impact des itérations sur le déroulement du processus de conception et aussi sur ses performances. En considérant trois types de problème de conception (la conception créative, la conception innovante et la conception routinière), nous avons étudié trois expériences de conception relatives à chaque type de problème. Deux expériences ont été réalisées en France et une en Roumanie.

Pour les expériences réalisées en France, la première a été réalisée dans la salle PICCO (Plateforme Intégrée de Conception et de Coopération) du laboratoire M3M de l’Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (la reconception d’un paquet de papier à cigarettes). La deuxième, une expérience de conception à distance, a été réalisée dans le cadre du groupe GRACC (Groupe de Recherche Coopératif d’Activité de Conception) entre les quatre universités de : Belfort, Grenoble, Nancy et Nantes (la reconception d’une remorque de VTT pour transporter un enfant).

L’expérience réalisée en Roumanie a eu comme objectif la reconception d’un dispositif de perçage d’une pièce. Cette expérience de conception a été réalisée à l’Université de Pitești, dans le Département de Technologie et Management, par un groupe de trois ingénieurs.

La démarche de recherche proposée dans cette thèse est présentée en six chapitres :

1. Le processus de conception dans le contexte de l’ingénierie simultanée.
2. La problématique de la thèse.
3. Les itérations dans le processus de conception.
4. L’utilisation de l’expérimentation en conception.
5. Analyse des expériences de conception.

6. Approche d'évaluation des performances du processus de conception.

Dans **le premier chapitre**, nous présenterons les éléments de l'état de l'art qui constituent le cadre théorique de notre travail. **Le deuxième chapitre** portera sur la problématique abordée dans cette thèse.

Dans **le troisième chapitre**, la notion d'itération dans le processus de conception est définie puis abordée par une analyse qualitative. Nous proposons, dans cette analyse, de classer les itérations selon différentes **typologies**. Cette étape est basée sur une étude bibliographique portant sur la modélisation du processus de conception, notamment dans un contexte d'ingénierie simultanée, et sur la modélisation des flux d'informations en conception. Cette classification va permettre un meilleur choix des méthodes de traitement des itérations afin de les éliminer ou les réduire. Ces méthodes sont également présentées dans ce chapitre.

Le quatrième chapitre est basé sur l'utilisation de l'expérimentation dans l'étude de la conception. Nous présentons dans ce chapitre des démarches globales de recherche en conception, puis notre démarche de recherche, utilisée dans cette thèse. Nous présentons ensuite les expériences de conception étudiées en détaillant les méthodes d'observation et de recueil des données relatives aux itérations.

Nous présentons, dans **le cinquième chapitre**, les analyses réalisées sur les expériences de conception. Le premier objectif de ce chapitre est de valider et d'enrichir la classification proposée pour les itérations. Aussi, les mécanismes d'apparition des itérations dans le processus de conception sont mieux cernés. Cette étape permet également d'aborder **l'analyse quantitative des itérations** dans le processus de conception.

Dans **le sixième chapitre**, nous proposons des **indicateurs d'évaluation des performances** du processus de conception basés sur l'étude des itérations. Deux types d'indicateurs sont présentés : (1) les indicateurs de processus, développés à partir de l'analyse des **objets intermédiaires de conception** et des interactions entre les concepteurs ; (2) les indicateurs de résultat, développés à partir de l'analyse quantitative des itérations.

Dans les différentes étapes de ce travail, des **stratégies de réduction des itérations** et/ou de leurs impacts sur le processus de conception, sont aussi proposées.

CHAPITRE 1

LE PROCESSUS DE CONCEPTION DANS LE CONTEXTE DE L'INGENIERIE SIMULTANEE

1 LE PROCESSUS DE CONCEPTION DANS LE CONTEXTE DE L'INGENIERIE SIMULTANEE

1.1 Introduction

Aujourd'hui, les entreprises industrielles sont confrontées à une concurrence de plus en plus sévère. En effet, la mondialisation des marchés et la montée en force des pays émergents, les sauts technologiques observés ainsi que des clients de plus en plus exigeants sont autant de facteurs que les entreprises industrielles doivent intégrer dans leurs stratégies de développement de produits. Les entreprises doivent innover sans cesse. Cette innovation ne doit pas s'arrêter aux produits proposés, mais doit aussi concerner les méthodes de développement de ces produits, afin de les mettre très rapidement sur le marché et à moindre coût. D'ailleurs, les concepts d'ingénierie simultanée ont été introduits, il y a plus de quinze ans, pour répondre à cet impératif de réduction des délais ou du « *Time to Market* ». Ces concepts visent à considérer avec plus d'importance les premières étapes de développement de produit, essentiellement celles de la conception. Certains chiffres ont été avancés dans la littérature pour montrer l'importance des premières étapes de développement. Par exemple, dans [CART 92] et [HARV 94], il est indiqué qu'un dépassement du budget de développement de 50% réduit les profits pendant la durée de vie du produit de seulement 3,5%. Par contre, un retard de six mois dans la mise de celui-ci sur le marché conduit à la perte de 30% des profits ! Des efforts considérables ont été ainsi déployés pour faire évoluer la conception, afin d'en améliorer les performances. Cette évolution a porté aussi bien sur les aspects techniques de la conception que sur le management du processus de conception.

Nous proposons, dans ce chapitre, de présenter le cadre de nos travaux de recherche au travers de l'étude du processus de conception, notamment dans un contexte de concurrent engineering. Le chapitre est organisé en quatre parties.

La première partie est dédiée à la présentation d'un état de l'art sur l'activité et le processus de conception. Cet état de l'art est dressé pour montrer l'évolution de la conception et situer le contexte de notre étude.

Dans **la seconde partie**, nous exposons quelques modèles du processus de conception. Ces modèles, tirés de la littérature, seront utilisés comme base de description et d'analyse dans notre travail. Nous noterons également la présence de la notion d'itérations dans l'ensemble de ces modèles.

Au travers de **la troisième partie**, nous donnerons un exemple montrant l'influence des itérations sur les délais et les coûts de conception et montrer ainsi l'importance de leur accorder une attention particulière, notamment dans une démarche d'ingénierie simultanée.

Enfin, une **conclusion** fera ressortir les besoins d'étudier les itérations pour améliorer les performances du processus de conception.

1.2 Points de vue sur la conception

La conception de produit est un processus complexe et dynamique. Il est complexe parce qu'il implique une combinaison d'un grand nombre de problèmes à résoudre, concernant aussi bien l'ingénierie du produit que le management des activités et des tâches de conception. Quant à son aspect dynamique, il est dû aux fréquentes perturbations affectant ses tâches. Ces perturbations peuvent être des aléas, des changements dans la mission d'une activité ou des remises en cause de mauvaises décisions techniques ou de management. Ceci conduit à une évolution permanente aussi

bien des tâches individuelles de conception que de l'architecture du réseau global du processus de conception.

La conception est définie par l'*AFNOR* [AFNO 88] comme une activité créatrice qui, partant des besoins exprimés et des connaissances existantes, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant à ces besoins et industriellement réalisable.

Perrin [PERR 01] définit la conception de produit comme l'ensemble des activités et des processus qui permettent de passer de l'idée d'un nouveau produit (ou de l'amélioration d'un produit existant) à la fourniture de l'ensemble des informations (plans, descriptifs, logiciels...) qui permettent de lancer la production de ce produit et d'en assurer l'usage et la maintenabilité. L'auteur souligne également que les termes conception de produit et développement de produit sont souvent utilisés pour désigner les mêmes activités. Toutefois, dans certaines entreprises, la conception désigne seulement certaines phases du développement de produit. Dans leur étude sur l'industrie automobile mondiale, *Clark* et al. [CLAR 87] définissent le développement de produit comme un ensemble d'activités de création et de communication d'informations qui transforme les données du marché et les opportunités techniques en informations pour la production ; ces informations sont : des modèles, des spécifications, des prototypes, des dessins, des logiciels, des spécifications de machines et d'outils.

Pahl et *Beitz* [PAHL 96] définissent la conception selon trois points de vue :

Du point de vue psychologique, la conception est une activité créative nécessitant de solides connaissances en sciences de l'ingénieur. Le concepteur doit également avoir d'autres qualités, comme le sens de l'initiative, l'esprit d'équipe, une vision économique, la ténacité et l'optimisme.

Du point de vue systémique, la conception est l'optimisation d'objectifs donnés avec prise en compte de contraintes conflictuelles. En effet, les solutions proposées par les concepteurs ne sont valables que pour des circonstances bien particulières qui peuvent être changées avec les spécifications des cahiers des charges.

Du point de vue organisationnel, la conception est une étape essentielle du cycle de vie d'un produit. Ce cycle représente le processus de conversion de matières premières en produits finis avec une forte valeur ajoutée. Les concepteurs doivent mener leurs tâches en étroite coopération avec des spécialistes de différentes disciplines et de différents métiers.

1.2.1 Classification des problèmes de conception

Selon *Brown* et *Chandrasekaran* [BROW 85] il y a trois classes de conception : la conception routinière, la conception innovante et la conception créative. Cette classification est retenue par plusieurs auteurs et elle est générique à la plupart des domaines d'application de la conception. Les trois classes sont établies en fonction des sources de connaissances et des stratégies de résolution de problèmes adoptées (Tableau 1).

Classes	Sources des connaissances	Stratégies de résolution de problèmes
Conception routinière	Connues	Connues
Conception innovante	Connues	Non connues
Conception créative	Non connues	Non connues

Tableau 1- Typologie des problèmes de conception

1.2.1.1 Conception routinière

Dans ce cas, on connaît la stratégie de conception, et les connaissances à mettre en œuvre sont identifiées. Le concepteur peut justifier ses choix de retenir ou non, telle ou telle solution. Il s'agit, en général, d'instancier ou de modifier des paramètres caractérisant des produits déjà conçus. La conception routinière, appelée aussi re-conception, représente environ 80 % des activités de conception mécanique [VARG 95]. Dans ce type de conception, bien que le problème soit bien formalisé, la recherche d'une solution spécifique peut être complexe et coûteuse à cause de la taille de l'espace des solutions ou du fait de la difficulté de mesurer toutes les conséquences d'un choix ou d'une modification.

1.2.1.2 Conception innovante

La conception porte sur un produit connu. La décomposition du problème est connue, mais les stratégies de conception pour chaque sous-problème ne sont pas connues. L'innovation correspond, généralement, à un besoin exprimé par des clients mais non encore satisfait. Dans ce cas, l'espace des solutions est plus large qu'au premier type de conception, ce qui engage le concepteur dans une importante activité de recherche et développement.

1.2.1.3 Conception créative

La conception créative porte sur un produit inconnu. Dans ce cas, il n'existe pas de solution produit a priori et les connaissances relatives au produit et au processus de conception ne sont pas clairement identifiées et maîtrisées. Le concepteur peut intervenir dans l'élaboration du cahier des charges et doit définir de nouvelles fonctions ou de nouveaux paramètres du produit conçu.

1.2.2 Modes de travail en conception (synchrone/asynchrone, à distance/en présentiel)

La conception est une activité qui mobilise plusieurs acteurs. L'organisation de ces acteurs, dans le temps et dans l'espace, donne lieu à différents modes de travail. Ainsi, par rapport à la dimension spatiale, les concepteurs peuvent travailler en présentiel (ensemble dans un même lieu), ou à distance (dans un environnement distribué). Par rapport à la dimension temporelle, les acteurs de la conception peuvent travailler de manière synchrone (en même temps) ou asynchrone (à des moments différents les uns par rapport aux autres). En fonction de ces deux dimensions, le travail réalisé par le concepteur peut être soit privé (il le garde pour lui) soit public (il le met à disposition des autres) [GARR 00].

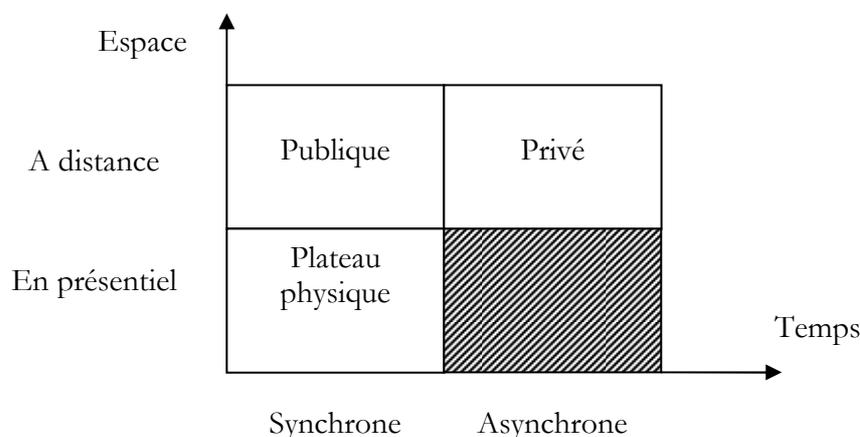


Figure 1- La conception selon les axes : espace-temps

1.2.3 Importance économique (coûts, délais, ...)

Depuis le début des années 80, la stratégie de compétition entre les entreprises a été modifiée. Les entreprises compétitives sont celles qui sont capables de transformer rapidement de nouvelles idées en nouveaux produits ou faire évoluer leurs produits par la maîtrise de leur processus de conception. *Perrin* [PERR 01] rapporte les résultats d'une enquête réalisée dans les années 90 auprès d'entreprises américaines, européennes et japonaises sur les objectifs poursuivis. Sept objectifs d'innovation de produit ont été préalablement identifiés. Il a été ainsi demandé aux entreprises d'indiquer ceux auxquels elles affectaient le plus de moyens. Les résultats de l'enquête sont résumés sur le tableau ci-dessous.

Objectifs	% des réponses
Mettre le nouveau produit à temps sur le marché	76 %
Améliorer l'attrait des nouveaux produits	73 %
Développer de nouveaux produits plus rapidement	68 %
Développer de produits plus faciles à produire, à utiliser et à maintenir	61 %
Réduire les coûts de développement de nouveaux produits	47 %
Réduire la période de <i>payback</i> des nouveaux produits	47 %
Accroître le nombre de nouveaux produits développés	44 %

Tableau 2- Les résultats d'une enquête sur les entreprises américaines, européennes et japonaises (*Perrin*)

1.2.3.1 Importance de la durée des études de conception

Le raccourcissement du « *time to market* » est de plus en plus une variable stratégique pour les entreprises. En effet, il permet de dégager des marges confortables. Par exemple, *Perrin* rapporte que sur le marché européen de l'autoradio, le premier fabricant qui annonce une nouveauté dans un produit peut le faire payer 20 % plus cher qu'un concurrent qui introduirait le sien un an plus tard. *Reinertsen* [REIN 83] a étudié le programme de développement d'une imprimante laser. Il a évalué l'impact de différents facteurs sur les bénéfices cumulés de ce produit. Il a trouvé qu'un retard de six mois dans la conception et le développement de produit est le facteur qui a le plus d'impact sur les profits attendus avec une perte de 31,5 %. Un dépassement de 30 % du budget de développement est le facteur ayant le moins de conséquences avec une perte de 2,3 % des bénéfices.

1.2.3.2 Influence de la conception sur les coûts de production

De nombreuses études sur les coûts de production ont montré que ses coûts sont principalement déterminés durant la phase de conception des produits. *Perrin* [PERR 01] propose, sur la figure ci-dessous, une évolution moyenne des coûts engagés tout au long des différentes phases du cycle de vie d'un produit faisant l'objet d'une production de masse. On y représente également les dépenses réelles durant ces phases. Il en ressort un résultat très important : les activités de conception ne représentent que 5 % du coût total d'un produit alors qu'elles figurent 75 % de ce coût total (Figure 2).

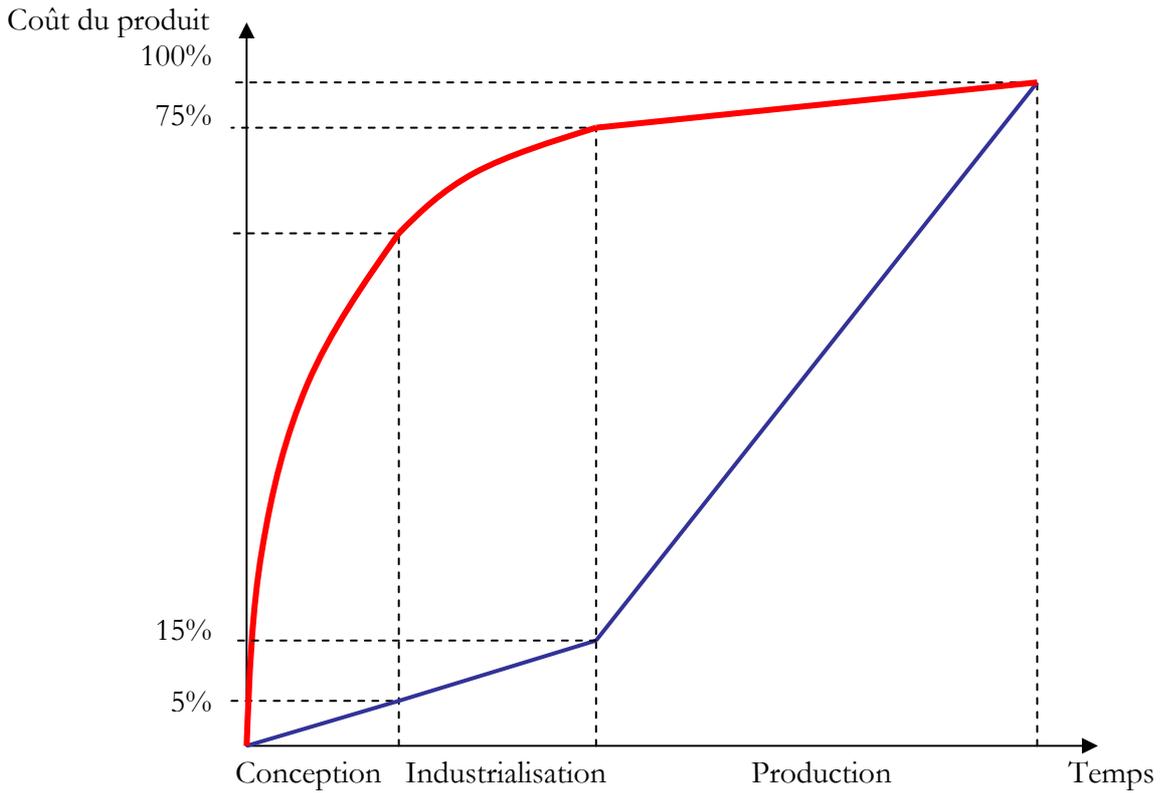


Figure 2- Conception et coût du produit

Deux autres renseignements sont à souligner quant au rôle critique des activités de conception. C'est durant les premières étapes de conception que nous disposons de plus de possibilités de modifications des choix de conception et c'est durant ces premières étapes que les coûts de modification sont les plus faibles (Figure 3).

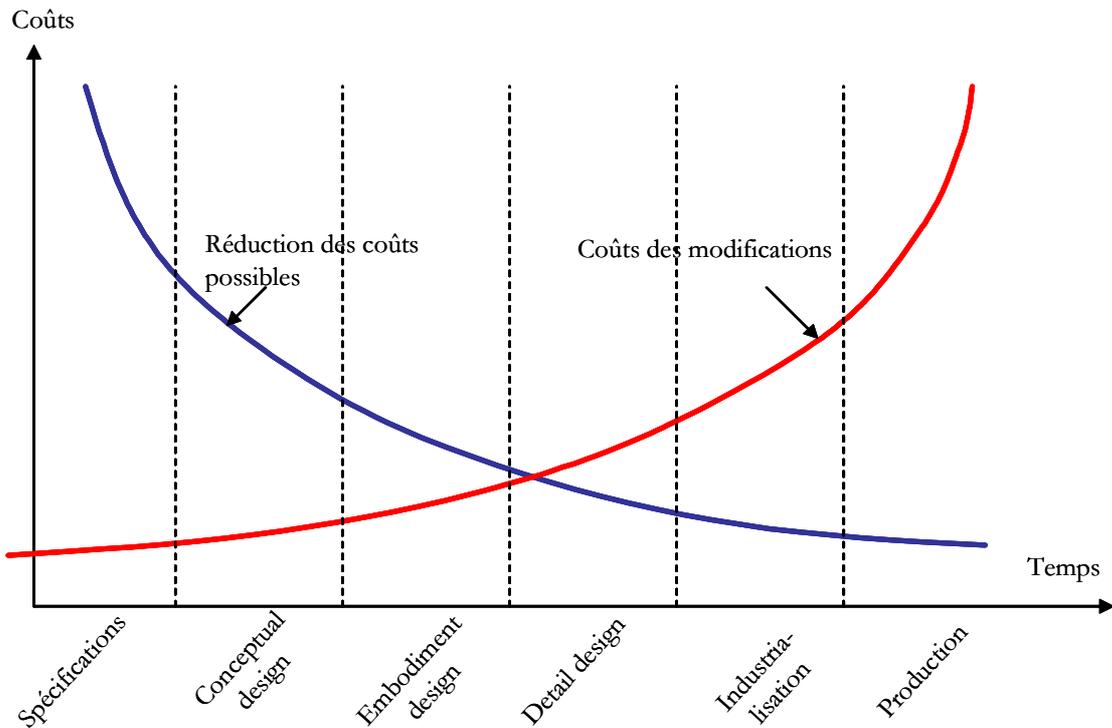


Figure 3- Influence des phases de conception sur la possibilité de réduction des coûts

Cette courbe montre l'importance des premières phases de conception. Si l'on passe plus de temps durant ces phases pour mieux étudier les différentes solutions de conception avec les différents acteurs du cycle de vie du produit, on dépensera certes plus d'effort mais par la suite les coûts du produit et les délais de mise sur le marché seront diminués. La Figure 4 montre qu'une augmentation de 20 % de la durée de la première phase de conception permet de réduire de 40 % la durée totale de conception.

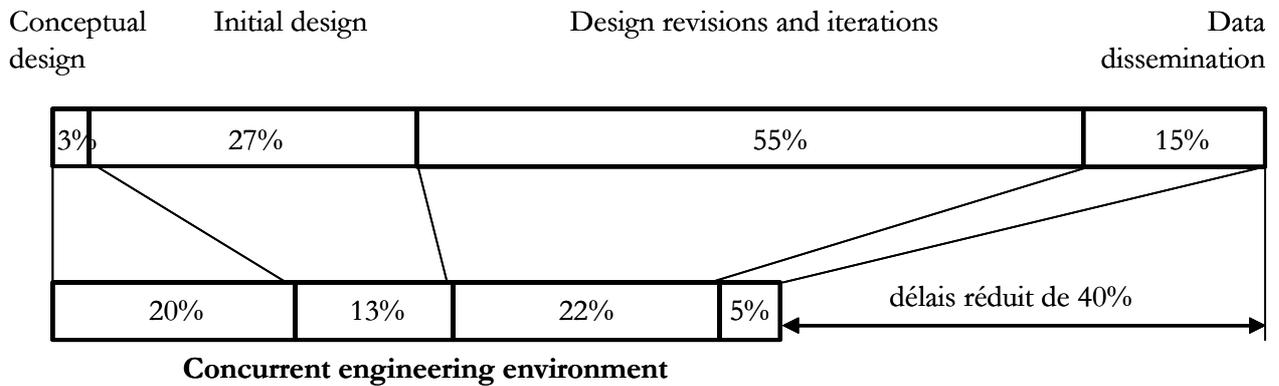


Figure 4- Le rôle stratégique des premières phases de conception

1.2.4 Evolutions techniques / management (CE)

Whitney [WHIT 90] présente la conception sous deux points de vue différents : (1) la conception est un processus technique à accomplir, (2) la conception est un processus organisationnel à gérer. Le premier point de vue concerne plus l'individu, alors que le second implique le groupe ou l'équipe de conception. Ces deux points de vue ne sont pas seulement d'égale importance, ils ne doivent pas être séparés.

1.2.4.1 Evolutions techniques

1.2.4.1.1 De la planche à dessin à la CAO

L'une des remarquables évolutions dans le monde de la conception est le passage de la planche à dessin à la CAO et notamment la CAO 3D. Cette dernière a permis un gain de productivité important dans les bureaux d'études [PERR 01]. Parmi ses principaux avantages, on peut citer :

- la rapidité et la simplicité des modifications de conception.
- l'automatisation de la création des mises en plan.
- la réutilisation des données CAO dans les tâches aval (par exemple en FAO).
- la réduction des temps d'analyse (éléments finis, vibrations, etc.).
- la réduction des cycles de fabrication (gestion d'assemblages complexes, recours minimal au prototypage physique, etc.).
- la configuration de produits dérivés ou de familles de produits.

1.2.4.1.2 De la CAO à la maquette numérique

Depuis l'apparition de la CAO, les technologies numériques proposées aux bureaux d'études n'ont cessé de se développer pour mieux répondre aux exigences de la concurrence. C'est ainsi que vers les années 1995, la maquette numérique a fait son apparition. Il s'agit d'une définition géométrique exhaustive et exacte du modèle en 3D et une représentation unique des données relatives au produit conçu. Tous les acteurs du développement de produit au sein de l'entreprise et, éventuellement, les sous-traitants ont accès aux mêmes données et contribuent à les enrichir. Les industriels peuvent

désormais concevoir la maquette détaillée de leur produit, en simuler toutes les fonctions et prévoir les différentes interactions entre les composants. Toutes les opérations de simulation et de calcul sont immédiates, car les données associées au produit sont directement intégrées à la maquette numérique.

1.2.4.1.3 De la maquette numérique au PLM

Le PLM (*Product Lifecycle Management*) se définit plus comme une approche transversale de création, de gestion et de dissémination de l'information auprès des différents services de l'entreprise, ou de ses partenaires, concernés par le produit : bureaux d'études, services marketing, achats, logistique, production et après-vente.

Grâce à une meilleure circulation de l'information dans l'entreprise, à la réduction du fossé qui peut parfois exister entre bureaux d'études et chaînes de production, à une prise en compte en amont des contingences liées aux évolutions du produit, le PLM permet d'apporter des améliorations concrètes en termes de fréquence de sortie de nouveaux produits, de gestion des ressources, de traçabilité des flux d'information (notamment avec les fournisseurs) et de rationalisation des données (création d'un référentiel unique).

1.2.4.2 Evolutions au niveau de l'organisation

1.2.4.2.1 Du séquentiel vers le simultané

Durant les dernières décennies, la pression économique exercée par les consommateurs oblige les constructeurs à être toujours plus réactifs et à renouveler toujours plus vite leurs gammes de produits. De plus, la mondialisation des marchés ouvre les portes à une concurrence de plus en plus forte à une échelle internationale. Cette situation pousse les entreprises à remettre radicalement en cause leurs processus de développement de produits, à revoir leur fonctionnement pour garantir leur survie, et à proposer des produits mieux adaptés. Après avoir travaillé à améliorer leurs méthodes de production, celles-ci vont alors profondément modifier leurs méthodes de conception et de développement de produit. La plus importante de ces modifications est l'introduction des concepts de concurrent engineering. L'objectif visé par l'introduction de cette approche de développement de produit est de réduire de manière significative les délais de mise à disposition d'un produit sur le marché (ou *Time-to-Market*). Cette préoccupation prend toute sa signification dans des environnements industriels incertains.

Cette nouvelle approche de la conception doit permettre de prendre en compte, dès les premières phases du projet de développement, l'ensemble du cycle de vie d'un produit, depuis sa définition jusqu'à son déclin en passant par son industrialisation, sa distribution et son utilisation [SOHL 92]. Elle doit permettre d'adopter une organisation simultanée pour paralléliser au mieux les différentes phases du processus de développement [SOHL 92] ou encore une organisation concourante pour converger vers un même objectif. Cette organisation doit donc impliquer la participation des différents acteurs représentant les différentes fonctions du cycle de vie du projet de développement.

1.2.4.2.2 L'Ingénierie Séquentielle

Le processus traditionnel de développement de produit est mis en œuvre par un enchaînement séquentiel de toutes les activités. Celles-ci sont distribuées dans des départements spécifiques, du marketing à la vente, en passant par le bureau d'études. Dans ce contexte, le processus de conception débute par la définition des besoins qui sont communiqués au bureau d'études. Pour satisfaire ces besoins, le bureau d'études propose alors des solutions techniques, sous forme de dessins, de spécifications techniques, de nomenclatures etc. Par la suite, les documents élaborés sont transférés vers le bureau des méthodes. Ici, les solutions proposées en avant sont détaillées et

préparées pour l'industrialisation. A la fin, des tests sont effectués pour vérifier si les besoins définis au début ont été bien satisfaits.

Le plus grand inconvénient de la démarche séquentielle est que chaque phase du processus de conception est traitée séparément et a pour conséquence que la phase suivante ne peut débuter que lorsque la phase en cours est achevée. Ceci conduit à de nombreuses demandes de modifications car les décisions sont prises sans l'avis des intervenants en aval. De plus, en raison de ce fonctionnement séquentiel, les erreurs se propagent le long du processus. Ces erreurs ne sont détectées que dans les phases ultérieures du processus, voire même au-delà, lors de l'industrialisation. La correction des erreurs devient ainsi complexe et coûteuse.

1.2.4.2.3 L'ingénierie simultanée

Le concurrent engineering est une approche organisationnelle systématique et globale de l'entreprise, basée sur la conduite simultanée et intégrée du cycle de vie du produit, mettant en œuvre des équipes pluridisciplinaires travaillant en symbiose et visant des objectifs de production communs de coût-délaï-qualité [SOHL 92]. Les principales caractéristiques du concurrent engineering sont :

- exécution parallèle des activités de développement,
- intégration et prise en compte des activités aval pendant le déroulement des activités amont,
- constitution d'équipes pluridisciplinaires qui regroupent différents acteurs impliqués dans le projet de développement de produit,
- optimisation des processus de développement existants.

Dans le domaine de conception, les principaux intérêts de mise en œuvre du concurrent engineering sont la réduction des coûts, la diminution des délais de conception et de mise sur le marché, et l'amélioration de la qualité des produits [LAWS 94]. En effet, l'intégration des métiers "aval" dans la phase de conception permet de détecter les erreurs très tôt dans le processus de développement. La qualité des produits est ainsi améliorée, les coûts supplémentaires dus aux modifications sont éliminés et les délais de mise sur le marché sont réduits.

1.2.4.2.4 Les principes de mise en œuvre de l'ingénierie simultanée

La mise en place du concurrent engineering repose sur deux principes fondamentaux : le parallélisme des tâches et le travail en équipe multidisciplinaires.

La notion de parallélisme peut avoir deux acceptions différentes. La première concerne la mise en parallèle des activités de développement, notamment la conception simultanée du produit et de son processus de production. La seconde concerne le développement simultané de plusieurs solutions afin de réaliser les meilleurs choix au plus tôt et éviter ainsi des itérations fort coûteuses.

Le principe du travail en équipe multidisciplinaire, quant à lui, permet la prise en compte, à chaque niveau de développement, des considérations relatives à l'ensemble du cycle de vie du produit. Ainsi, par exemple, les contraintes de fabrication doivent être considérées dès les premières phases de conception. Ceci permet non seulement de réduire les itérations et les demandes de modification des solutions mais aussi d'améliorer la qualité.

Il faut noter que le passage de l'approche séquentielle vers le concurrent engineering nécessite un changement de la démarche de management du processus de conception. La méthode séquentielle a l'avantage d'indiquer clairement aux différents responsables les moments propices d'intervention sur l'avenir du projet où l'on dispose des éléments informationnels nécessaires pour le contrôle et la prise de décision. Avec la seconde forme d'organisation, les responsables doivent adopter de nouveaux modes de travail afin de pouvoir contrôler la progression des activités et leur interaction. La démarche de management se trouve en cela profondément modifiée.

1.3 Des modèles pour des démarches de conception

Comme nous l'avons déjà souligné, un des enjeux importants pour la compétitivité des entreprises d'aujourd'hui est leur maîtrise parfaite du processus de développement de produit et plus particulièrement le processus de conception. De plus, l'activité de conception suscite de plus en plus d'intérêt de la part de chercheurs dans différents laboratoires et différentes disciplines. Une façon de comprendre, d'appréhender et d'agir sur ce processus consiste à le modéliser. Le travail d'élaboration d'un modèle permet de mieux comprendre les caractéristiques fonctionnelles et comportementales des composantes du processus de conception. L'exploitation du modèle permet de définir, tester et améliorer des stratégies de conduite et de contrôle de ce processus.

Plusieurs modèles du processus de conception sont proposés dans la littérature. Ce nombre important reflète l'intérêt, de plus en plus grandissant, accordé à l'activité de conception. Les objectifs de la modélisation sont différents. Il s'agit pour certains de comprendre l'activité de conception. Les travaux de recherche dans ce domaine sont relativement récents bien que l'activité de conception existe depuis des millénaires. D'autres travaux de modélisation visent le développement d'outils d'aide à la conception. Enfin, certains travaux ont pour objectif de prescrire des méthodes de conception ou d'enseigner la conception.

On peut classer les modèles du processus de conception en deux grandes familles : les modèles prescriptifs et les modèles descriptifs. D'autres familles de modèles sont proposées dans la littérature, mais on se limitera à ces deux, vu leur intérêt par rapport à notre étude.

1.3.1 Les modèles prescriptifs

Ils portent sur le processus que les concepteurs devraient suivre dans leur démarche de conception. Ce type de modèles peut être décomposé en deux catégories :

- la prescription de la procédure à suivre et des activités à réaliser,
- la prescription des états et des attributs du produit.

Une description standard de ce que devrait être un processus de conception revient souvent dans la littérature et les manuels de conception. Cependant, d'après *Finger* et al. [FING 89], il n'existe pas de résultats de recherche indiquant que l'on obtient systématiquement de meilleures solutions de conception si le modèle prescriptif est suivi.

1.3.2 Les modèles descriptifs

Contrairement aux méthodes prescriptives, la modélisation descriptive du processus de conception est basée sur la description et la représentation de la procédure mentale suivie par le concepteur. Les travaux de recherche menés dans ce domaine consistent en l'étude des processus, des stratégies et des méthodes de résolution de problèmes utilisés par les concepteurs [FING 89]. La plupart de ces travaux de recherche sont basés sur les techniques d'intelligence artificielle et la construction de modèles cognitifs du processus de conception. Les modèles descriptifs sont essentiellement développés pour les activités de conception préliminaires menées au bureau d'études.

L'objectif de la modélisation descriptive du processus de conception est de mieux comprendre les mécanismes de la conception, d'améliorer l'efficacité de ce processus et de permettre le développement de systèmes d'aide à la conception.

1.3.3 Exemples de modèle du processus de conception

Dans ce qui suit, nous présentons quelques modèles du processus de conception. Ces modèles seront utilisés, dans les chapitres suivants, comme base pour l'analyse du processus de conception. D'autres modèles seront présentés dans le deuxième chapitre.

1.3.3.1 Le modèle de Pahl et Beitz

Il s'agit d'une représentation du processus de conception comme succession hiérarchique de phases. C'est l'un des modèles les plus reconnus parmi les modèles prescriptifs. Le modèle est composé de quatre phases principales : (1) *planning and clarifying the task*, (2) *conceptual design*, (3) *embodiment design*, (4) *detail design*.

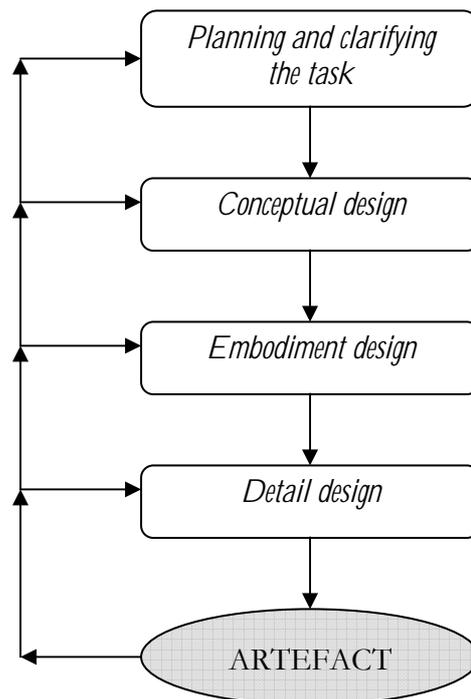


Figure 5- Le modèle de *Pahl* et *Beitz*

Clarification du problème (*planning and clarifying the task*)

La première phase consiste à établir le cahier des charges en détaillant les spécifications techniques et économiques à atteindre. Le résultat de cette phase est une spécification initiale du produit, exprimée sous forme d'une liste de fonctions et de caractéristiques que doit remplir le produit, un ensemble de contraintes et éventuellement des objectifs de coût et de délai de mise sur le marché.

Formalisation et spécification des principes (*conceptual design*)

A partir du cahier des charges, le concepteur va structurer, hiérarchiser et caractériser les différents besoins fonctionnels exprimés. Un concept de l'objet à concevoir est ainsi choisi, suite à une analyse fonctionnelle et une étude des possibilités techniques disponibles pour chaque fonction et sous-fonction. C'est au terme de cette phase que naissent les premières représentations graphiques et maquettes du produit. Durant cette phase, le concepteur peut être amené à proposer et développer sa propre solution soit quand elle n'existe pas, soit pour des raisons d'innovation.

Conception d'ensemble (*embodiment design*)

Durant cette phase, le concepteur élabore une description technique complète et la structure finale du produit en termes de formes et de dimensions. Souvent, plusieurs solutions possibles sont évaluées, pour en choisir la plus satisfaisante, suivant des critères économiques et techniques. C'est ainsi que, durant cette phase, les tâches d'analyse et de synthèse se succèdent et se complètent avant d'aboutir à une solution satisfaisante.

Conception détaillée (*detail design*)

Au cours de cette phase, on va élaborer les documents nécessaires à l'achat ou à la mise en fabrication des composants et sous-ensembles du produit conçu. Le concepteur définit complètement et en détail chaque composant en spécifiant ses dimensions, ses caractéristiques physiques (matériaux), ses schémas et ses plans détaillés, son coût et une description de son processus d'industrialisation (fabrication, assemblage). Au terme de cette phase, le produit est entièrement décrit de telle sorte que les informations générées puissent être exploitées par tous les acteurs des étapes suivantes du cycle de vie du produit.

Notons que, dans ce type de modèle de représentation, le processus de conception n'est pas forcément un processus linéaire descendant. Le modèle permet également de rendre compte des nombreuses interactions, feedbacks, entre phases et entre étapes intermédiaires.

1.3.3.2 Le modèle de Roozenburg et Eekels

Roozenburg et *Eekels* [ROOZ 95] proposent une modélisation de la conception comme itération d'un cycle élémentaire de conception. Dans ce modèle, à la différence du modèle de *Pahl* et *Beitz*, les solutions de conception et les spécifications évoluent simultanément. A une étape donnée du processus de conception, un ensemble de spécifications déterminent une solution de conception qui, à son tour, contribuera à définir un nouvel ensemble de spécifications.

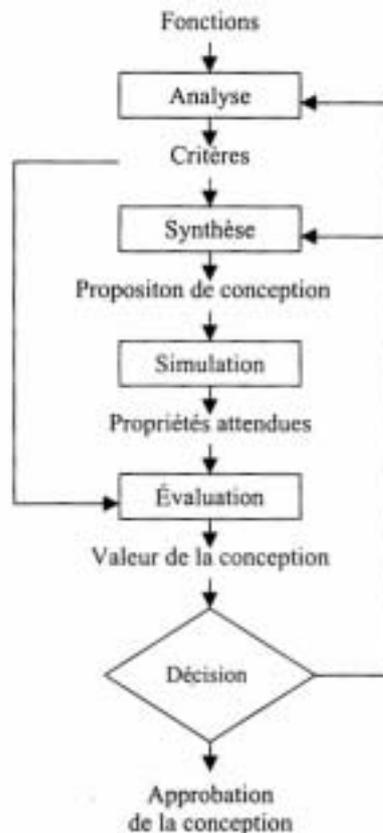


Figure 6- Cycle élémentaire de conception selon *Roozenburg* et *Eekels* [ROOZ 95]

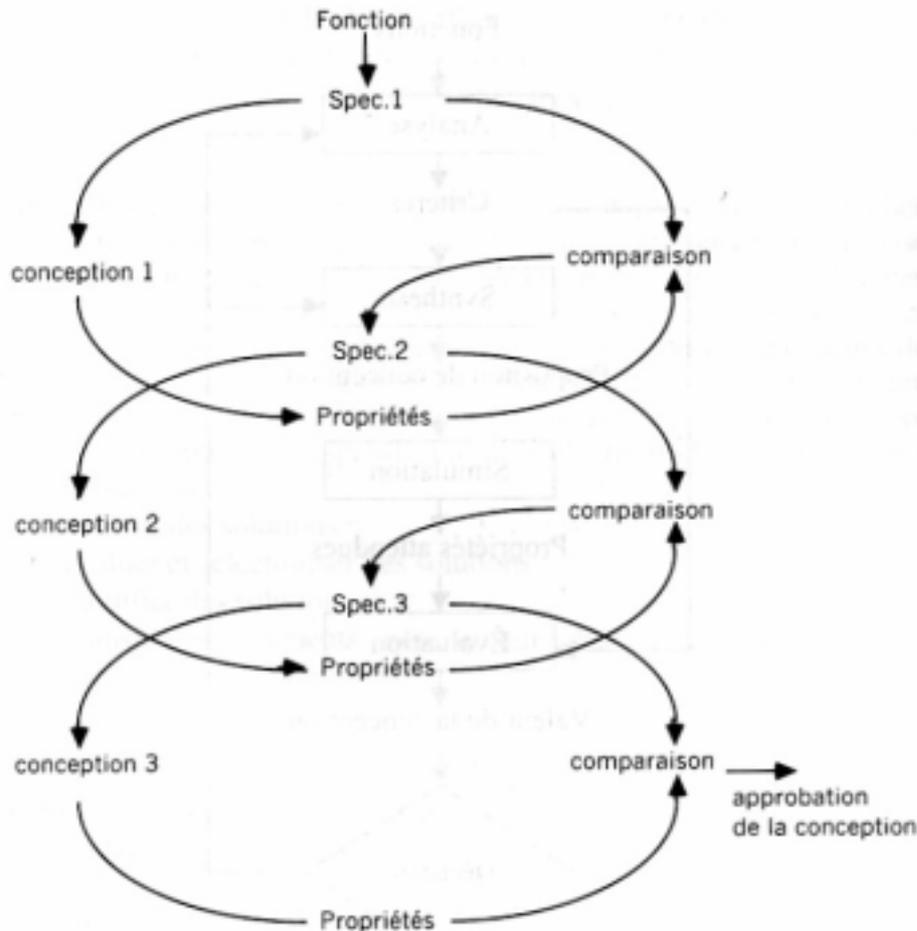


Figure 7- La structure itérative du processus de conception [ROOZ 95]

1.3.3.3 Le modèle FBS

Le modèle Fonction, Behavior, Structure (FBS) permet une représentation explicite des fonctions du produit (le problème), de la structure du produit (la solution) et des comportements internes du produit [HU 00].

Fonctions : elles décrivent, de manière abstraite, les finalités d'un objet (processus, produit ou ressource). Les fonctions de service sont formulées indépendamment de toute solution particulière (en particulier de tout choix de structure), alors que les fonctions techniques sont tributaires d'un choix de solution.

Comportement : il décrit la dynamique d'un objet. Il peut comprendre un ensemble de lois et de règles (modèles continus) ainsi qu'une suite séquentielle d'états (modèles discrets) représentant l'évolution d'une structure suite à une excitation (ou stimulation) au cours d'un processus donné.

Structure : elle permet de spécifier les éléments qui composent l'objet modélisé ainsi que les attributs de ces éléments.

Gero [GERO 90] ajoute la distinction entre le comportement de la structure (*structure behavior*) et le comportement attendu (*expected behavior*). Les domaines comportementaux F et S sont distincts. Le comportement F désigne ce qui est attendu de la structure, et le comportement S ce qui en est constaté. Ces domaines sont constitués de variables et sont reliés par des activités de transformation (flèches simples) ou de comparaison (flèche double) (Figure 8).

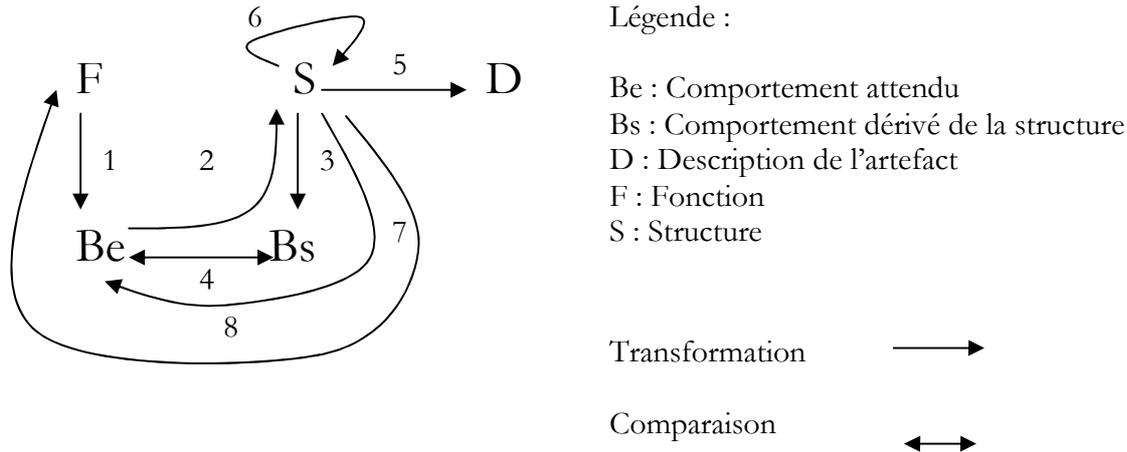


Figure 8- Le modèle FBS par Gero [GERO 90]

Grâce à ce modèle, 8 activités sont identifiées :

- La formulation (le processus 1) transforme le problème de conception exprimé par une fonction (F) en comportement (Be), qui est attendu pour permettre cette fonction.
- La synthèse (le processus 2) transforme le comportement prévu (Be) en structure de solution (S) qui est (prévue) censée manifester ce comportement désiré.
- L'analyse (le processus 3) détermine le comportement (Bs) de la structure synthétisée (S), dans le processus 2.
- L'évaluation (le processus 4) compare le comportement dérivé de la structure (Bs) au comportement prévu (Be) pour préparer la décision d'accepter la solution de conception.
- La documentation (le processus 5) produit la description de conception (D) pour construire ou fabriquer le produit.
- Le type 1 de reformulation (processus 6) provoque des changements de l'espace d'état de la conception, en termes de variables de structure ou gammes de valeurs pour elles.
- Le type 2 (processus 7) provoque des changements de l'espace d'état de la conception, en termes de variables de comportement attendues ou gammes de valeurs pour elles.
- Le type 3 (processus 8) provoque des changements dans l'espace d'état de la conception, en termes de variables de fonction.

1.4 Les itérations : un risque accentué par l'Ingénierie Simultanée

Le processus de conception est très rarement un processus linéaire. Il est surtout un processus itératif car à chaque étape, il faut procéder à des choix qui, pour être clairs, nécessitent plus d'informations ou plus d'études. Ces informations n'étant disponibles que plus tard dans le processus, des retours aux étapes amont, déjà terminées, devient une nécessité.

Dans l'Ingénierie Simultanée, les activités sont effectuées simultanément autant que possible. Parfois, les tâches sont exécutées en chevauchement par la transmission d'informations partielles, non figées, donc susceptibles d'évolution (voir chapitre 3, §3.3). Suite à cette évolution, des tâches déjà exécutées peuvent être refaites. Les itérations sont ainsi nécessaires dans le processus de conception, aussi bien dans une organisation séquentielle que celle de l'ingénierie simultanée. Il faut, cependant, souligner que leur impact est différent dans chacune d'entre elles.

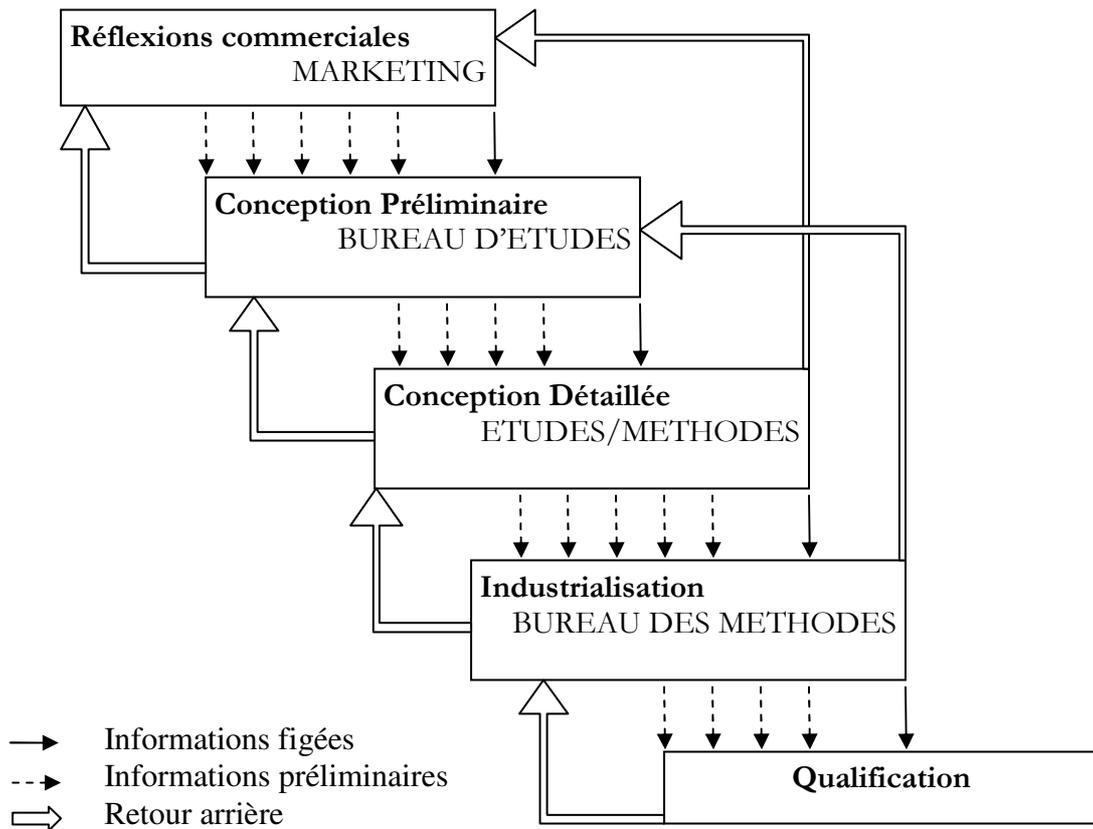


Figure 9- Echanges d'informations dans un processus de conception en Ingénierie Simultanée

Nous présentons ci-après un exemple simple, tiré de [BOUD 00], montrant l'impact des itérations dans un processus dans lequel les activités de conception sont exécutées d'abord en série puis en chevauchement. Les risques sont quantifiés en termes de délais et de coûts.

Le processus considéré est composé de deux activités de conception, chacune d'elles étant décomposées en trois étapes reliées par des contraintes d'antériorité. Nous supposons que toutes les étapes ont le même coût « c » et la même durée « t ».

La mise en œuvre de l'ingénierie simultanée permet une réduction de la durée tout en conservant le même coût engagé dans l'organisation séquentielle (figure 10). Ce constat est vrai si les tâches se déroulent sans problème de réalisation et sans retour arrière.

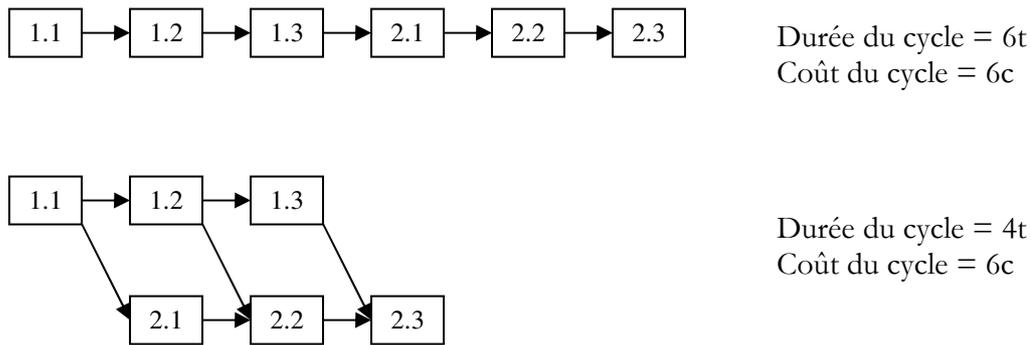


Figure 10- Durée et coût de cycle sans perturbation

Dans ce cas, l'avantage de la mise en parallèle des tâches est de réduire la durée du processus de conception. Par contre, cette parallélisation peut engendrer des risques si des tâches doivent être refaites (itération). En effet, le déroulement des activités est souvent perturbé. A l'origine de ces perturbations se trouve le fait qu'en pratique, les contraintes de coût, de durée et de qualité peuvent rendre impossible le bon déroulement de certaines tâches. Ces contraintes sont générées par des tâches amont qu'il devient nécessaire de relancer à nouveau en cas d'échec d'une activité pour permettre sa réalisation. Supposons, pour notre exemple, que l'étape 1.3 nécessite une remise en cause de l'étape 1.2. Dans ce cas, la mise en œuvre du parallélisme ne garantit pas systématiquement un gain de temps sans détérioration du coût (Figure 11).

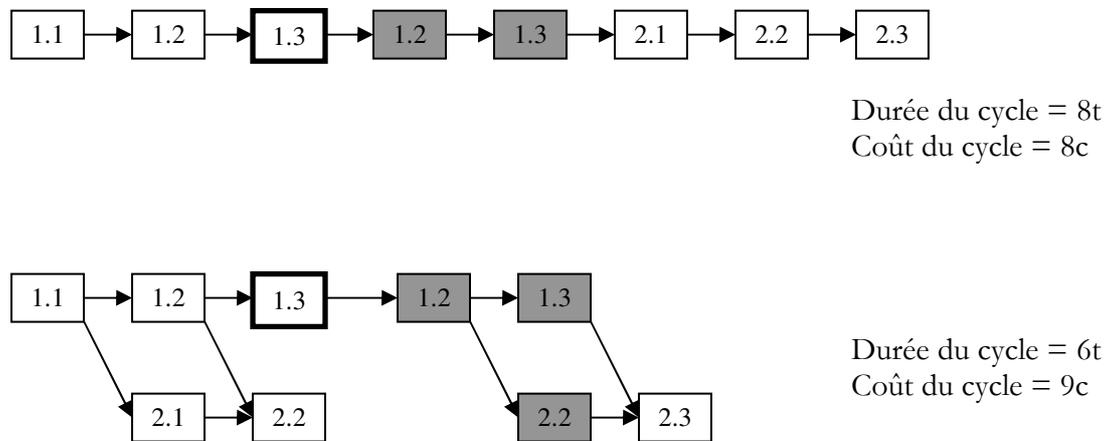


Figure 11- Durée et coût de cycle avec perturbation

Les risques d'avoir une itération dans un réseau d'activités exécutées en chevauchement (spécifique à l'Ingénierie Simultanée) peuvent être plus importants que les risques d'avoir une itération dans un réseau d'activités exécutées en série (spécifique à l'Ingénierie Séquentielle). Certes cet exemple est très simple, mais l'idée que des risques sont induits par la parallélisation des tâches est bien réelle. En termes de travail de groupe, l'Ingénierie Simultanée constitue un contexte particulier. Comme il s'agit d'équipes pluridisciplinaires, les problèmes liés à la communication entre les différents métiers et les différentes cultures peuvent introduire des erreurs qui génèrent des retours arrière pour être corrigées.

1.5 Positionnement de nos travaux

1.5.1 Types de problèmes de conception

Dans cette thèse, nous considérons les trois types de conception : routinière, innovante et créative. L'étude expérimentale portera notamment sur trois expériences de conception chacune représentant un type de problème. Ceci dit, nous focaliserons plus notre travail sur la conception routinière, en particulier lors du développement des indicateurs de performance du processus de conception.

1.5.2 Modes de travail des concepteurs

Deux modes de travail ont été considérés dans cette thèse : le travail à distance et le travail en présentiel. Dans les deux cas, nous avons considéré le travail synchrone des concepteurs. Nous avons en particulier analysé les revues de conception où tous les acteurs sont réunis. En effet, il est plus facile de récolter et d'analyser les données concernant ces revues de conception que d'analyser le travail, en asynchrone, de chaque acteur.

1.5.3 Ingénierie séquentielle / simultanée

Bien que nos travaux soient orientés vers des applications dans un contexte d'ingénierie simultanée, l'étude et l'analyse des itérations s'appliquent aussi bien dans une démarche séquentielle que simultanée. Nous verrons, cependant, que certaines méthodes d'analyse s'appliquent dans un contexte particulier.

1.5.4 Démarche de modélisation

L'analyse des itérations dans le processus de conception peut se faire à différents niveaux de décomposition. Selon le niveau de décomposition considéré, la méthode de modélisation à adopter sera différente. Nous choisirons donc, pour chaque type d'analyse, globale ou locale, le modèle le plus approprié.

1.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur la conception et le Processus de Conception. Ce dernier est devenu une source de compétitivité pour les industries manufacturières et son optimisation est un facteur de survie dans une concurrence mondialisée et de plus en plus sévère. L'étude de la conception nécessite la spécification des types de problèmes abordés, la connaissance des modes de travail des concepteurs et l'organisation du processus de conception. Notre état de l'art a abordé ces éléments. Les démarches d'amélioration de la conception nécessitent souvent la modélisation du processus. Nous avons présenté les deux grandes familles de modèles existants, prescriptifs et descriptifs, puis nous avons présenté quelques uns des modèles les plus répandus dans la littérature. Dans ce chapitre, nous avons également abordé et introduit la notion d'itération dans le processus de conception. Comme nous l'avons souligné, les itérations influencent directement les coûts et les délais de conception, donc ses performances. Il est intéressant de bien comprendre les mécanismes d'apparition des itérations et leur impact sur le processus de conception. C'est l'objet de notre travail dans cette thèse et nous proposons de détailler cette problématique dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE ABORDEE DANS LA THESE

2 PROBLEMATIQUE ABORDEE DANS LA THESE

2.1 Introduction

Confrontées quotidiennement à une conjoncture internationale de plus en plus difficile, à l'émergence de nouveaux marchés et à la pression croissante de la compétition, les entreprises sont obligées d'améliorer leur cycle d'élaboration des produits. Les interventions sur ce cycle ont pour objectifs :

- la réduction des coûts et des délais ;
- l'amélioration de la qualité ;
- la diversification des produits nouveaux ;
- le développement de produits plus faciles à fabriquer, à vendre, à installer, à maintenir, ... ;
- le développement rapide de nouveaux produits.

Pour atteindre ces objectifs, les entreprises ont adopté, entre autres solutions, la démarche de l'Ingénierie Simultanée. Cette démarche, basée sur le chevauchement des activités de conception et l'implication d'équipes pluridisciplinaires dans la conception, a permis des gains en temps de développement, une augmentation de la qualité des produits, une augmentation de la créativité, etc. [LAWS 94]. D'autre part, l'Ingénierie Simultanée a introduit des changements dans l'organisation du processus de conception et son déroulement. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (§1.4), ces changements peuvent induire plus de risques que ceux de l'ingénierie séquentielle. Dans ce contexte, il est important d'évaluer les performances du processus de conception, par rapport aux objectifs cités ci-dessus, et en prenant en compte les itérations. Pour cela, il faut déterminer des critères d'efficacité de l'activité de conception et du processus de conception et élaborer les indicateurs correspondants.

2.2 Critères et indicateurs de performance du Processus de Conception

L'élaboration et le suivi d'indicateurs constituent une démarche primordiale afin de permettre aux acteurs impliqués dans le processus de conception, notamment les chefs de projet, d'avoir une vision claire sur la planification et le déroulement du processus de conception. Les indicateurs permettent ainsi à ces acteurs d'intervenir dans le processus pour améliorer ses performances.

Dans une brochure du CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques), on trouve une mise en garde à propos des indicateurs d'efficacité de l'acte de conception : « *Ils doivent viser à corriger le processus et à vérifier son efficacité sans être un jugement sur l'activité de telle personne ou de tel service. Il faut souvent être attentif à la communication autour des indicateurs pour ne pas générer des conclusions hâtives, et éviter les polémiques inutiles* » [CETI 95]. En conséquence, les indicateurs ne doivent pas constituer un facteur qui réduise la flexibilité du processus ou des sources de conflits, mais par contre ils doivent être une aide pour les acteurs et pour les décideurs, conduisant à une bonne compréhension et à une évaluation efficace du processus de conception.

2.2.1 Les critères de performance

Les critères servent de base pour évaluer la performance du Processus de Conception. En première instance, pour ce travail, les trois constituants du « triangle d'or » de la compétitivité : **le coût, la qualité et les délais**, ont été choisis comme critères d'évaluation.

Quel que soit le modèle considéré du processus de conception, c'est un découpage en séquences, en étapes, qui apparaît invariablement comme sa caractéristique majeure. Le processus de conception met en œuvre des savoir-faire différents, des compétences complémentaires successives, permettant de passer de la conceptualisation, à partir des spécifications, à l'élaboration d'une solution générale, ensuite détaillée, pour aboutir à un produit défini. De là, il est important de considérer la **fluidité de l'enchaînement** des phases comme un critère d'efficacité du processus de conception.

Prenant en compte la spécificité de la conception, d'autres critères peuvent aussi être considérés : le fonctionnement du processus de conception lui-même ; son séquençement, son organisation, sa réactivité, etc.

2.2.2 Les indicateurs de performance du Processus de Conception

Dans leur approche, *Clark* et *Fujimoto* [CLAR 87], préconisent quatre étapes de base pour créer des indicateurs de performance :

1. définir les facteurs critiques vis-à-vis de la satisfaction du client ;
2. élaborer un processus trans-fonctionnel permettant d'atteindre les résultats ;
3. identifier les tâches et les moyens critiques requis pour mener le processus avec succès ;
4. élaborer des indicateurs qui permettent le suivi de ces tâches et moyens.

Les indicateurs de pilotage du processus de conception doivent être des outils de contrôle et de décision. Ils doivent permettre de mesurer une situation ou un risque, de donner une alerte ou au contraire de signifier l'avancement correct du projet. Le choix d'indicateurs dépendra des objectifs du projet.

Dans cette étude deux catégories d'indicateurs sont utilisées :

- Les indicateurs de résultats – sont des indicateurs de transformations physiques diverses, utilisés pour le contrôle de gestion traditionnel (des indicateurs de coûts, des indicateurs de la qualité, etc.) ; ils sont positionnés sur l'objectif fixé et permettent de savoir si la cible est atteinte ou non.
- Les indicateurs de processus – sont des indicateurs positionnés sur les actions contribuant le plus à l'atteinte des objectifs. Ils permettent d'agir par anticipation et corriger le déroulement du processus de conception en cas de dérive. Ils sont nécessaires parce que la composante immatérielle du processus de conception (créativité, confrontation d'idées, émission d'hypothèses) rend d'autant plus difficile la mesure de performance par un ratio entre les résultats et les moyens mis en œuvre. Les indicateurs de processus présentent l'avantage de pouvoir être suivis et actualisés au fur et à mesure de l'avancement du processus de conception, ce qui permet de réagir aux perturbations et dérives constatées.

Les deux types d'indicateurs jouent un rôle complémentaire : les indicateurs de processus montrent les moyens d'arriver aux bons résultats et les indicateurs de résultats indiquent si les objectifs sont atteints et à quel niveau.

Pour pouvoir établir les indicateurs les mieux adaptés à notre étude, nous devons analyser les caractéristiques du processus de conception. Nous allons particulièrement étudier les problèmes affectant ses performances. En effet, nous considérons que tout problème affectant les performances du processus de conception sera lié ou traduit par des itérations au niveau des tâches et des activités de conception.

2.3 Problèmes affectant les performances du processus de conception

La conception est un processus dynamique et complexe. Sa dynamique est caractérisée par des échanges d'informations entre ses activités, afin de résoudre les problèmes proposés. Sa complexité est issue, entre autres, des différents types d'informations échangées entre les participants des différents métiers, par la nature du produit, par les outils employés, etc. Ces caractéristiques font que le processus de conception est par nature un processus itératif. Les itérations peuvent être observées, non seulement entre les différentes phases de la conception (figure 12), mais aussi entre les activités et au sein même de ces différentes activités.

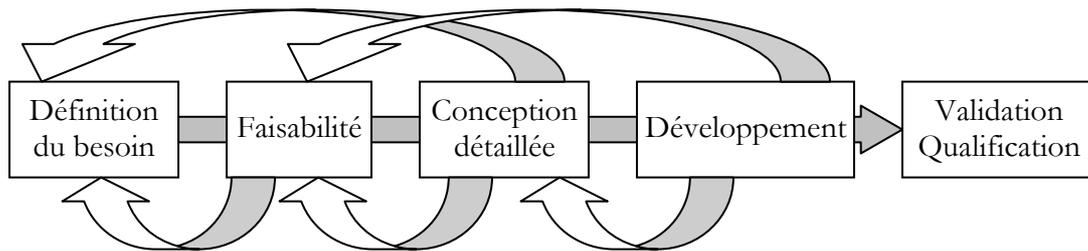


Figure 12- Le flux d'information entre les étapes du processus de conception [AFNO 04]

Nous présentons ci-après quelques exemples de problèmes, liés à la conception et au processus de conception, conduisant à la génération des itérations et la dégradation des performances. Ces problèmes sont classés en trois catégories : organisationnel, informationnel et opérationnel.

2.3.1 Aspect organisationnel

Nous mettons l'accent ici sur le passage de l'ingénierie séquentielle vers l'ingénierie simultanée. Le travail en équipes multi-métiers et le chevauchement des activités va induire de nouveaux problèmes qu'il faut considérer.

- Le travail coopératif introduit de nouveaux couplages entre les activités de conception créant de nouvelles **interdépendances** entre ces activités. L'influence mutuelle des activités provoque irrémédiablement des remises en cause et donc des itérations dans le déroulement du processus.
- La diversité des métiers et des connaissances utilisées dans une ou plusieurs activités, introduit souvent des problèmes d'**incompatibilités** des solutions par rapport aux différents métiers considérés.
- Les métiers peuvent-ils toujours **communiquer** entre eux d'une manière efficace ? D'après *Salau* [SALA 95], « *la communication constitue un élément incontournable dans le concept du concurrent engineering car elle est le fondement du consensus et d'une prise de décision rapide. En l'absence de communication, les décisions sont bloquées par des détails* ».
- Bien qu'il y ait des équipes multi-métiers qui interviennent dans les activités de conception, souvent les bureaux d'études font appel à la **sous-traitance**. Le taux de sous-traitance est un indicateur simple qui peut être aussi pris en compte dans l'évaluation du processus de conception.

2.3.2 Aspect opérationnel

Les concepteurs utilisent aujourd'hui des méthodes qui ont été développées pour stimuler la créativité, pour faciliter les interactions entre les participants et pour mieux utiliser le savoir-faire nécessaire pour proposer et développer des solutions pour concevoir des produits nouveaux. Pour un processus de conception, les **connaissances** engagées sont très importantes, leur nature ayant un rôle essentiel sur le déroulement et les performances du processus. On peut classer les connaissances en [CATT 04] :

- connaissances explicites (savoir) et connaissances implicites (savoir-faire) ;
- connaissances routinières (structurées) et connaissances non routinières (non structurées) ;
- connaissances non partagées (privées) et connaissances partagées (publiques ou en équipe) ;
- connaissances sur le produit et connaissances sur le processus lui-même.

Souvent, dans un processus de conception, le manque de connaissances (l'**incertitude**) va réclamer la nécessité de faire des retours en arrière, pour réduire l'incertitude existante ou construire de nouvelles connaissances, servant comme moteur pour l'avancement du processus.

Sur la Figure 13, nous présentons un exemple d'activité réitérée. Suite à une première exécution de l'activité « i », les concepteurs disposent d'un certain degré de connaissances (« x » connaissance). Pour construire plus de connaissances, ils doivent réitérer l'activité. Dans ce cas, l'itération permet un enrichissement des connaissances, mais aussi une augmentation du temps et du coût de l'activité.

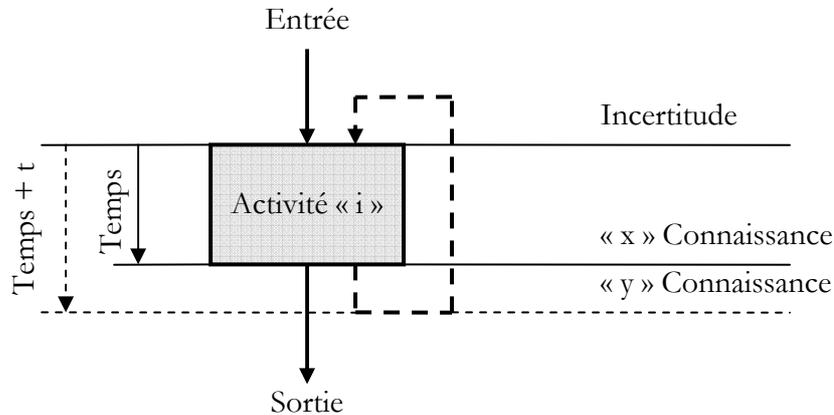


Figure 13- Itérations et construction de connaissances

Ce type d'itérations, liées à l'incertitude, constitue des actions courantes au sein du processus de conception et on peut les considérer comme un signe de dysfonctionnement du processus de conception au regard de sa fluidité.

Les outils et les méthodes sont aussi des artefacts mis en œuvre pour aider à la conception. De plus en plus, la tendance est de réaliser le plus possible la conception dans le domaine numérique, afin de réduire les délais et les coûts. Les outils numériques utilisés sont les outils de représentation (CAO,...), de simulation (maquette numérique, simulation cinématique, dynamique,...) ou de dimensionnement (éléments finis,...). Ils sont manipulés par des participants et vont leur conférer un certain pouvoir et une certaine autonomie. Autrement, leur usage va structurer l'activité même des acteurs et du réseau. Il est important d'observer et d'analyser leur impact sur le processus de conception, prenant en compte les aspects suivants :

- Les outils sont porteurs de connaissances au même titre que les acteurs ;
- L'utilisation d'un outil existant est caractéristique du jeu des acteurs et des hypothèses qu'ils font sur l'objet qu'ils conçoivent ;
- Un outil est porteur de contraintes qui influencent le processus de conception et son résultat. Une solution moins performante peut être souvent choisie parce que l'étude d'une solution plus performante nécessite l'utilisation d'un outil plus complexe et l'étude devient trop longue et trop coûteuse. Cela peut influencer aussi les retours en arrière.

Au deux éléments précédents (construction de connaissances et les outils et les méthodes utilisés) s'ajoutent les erreurs de conception. D'après *Stewart* [STEW 92], 75% des échecs en conception sont dus aux erreurs (erreurs de calcul, erreurs de codage/décodage, erreur de la méthode, etc.).

2.3.3 Aspect informationnel

Un des problèmes importants à considérer dans notre étude est celui de l'optimisation des **flux d'informations** en fonction des ressources et des **liens entre les activités** du processus de conception. En effet, un nombre important de retours arrière est dû aux **interdépendances** entre

les activités couplées. Sur la Figure 14, l'activité « i » a besoin, comme l'information d'entrée, d'une information fournie par l'activité « j ». Cette dernière a également besoin d'une information d'entrée fournie par l'activité « i ».

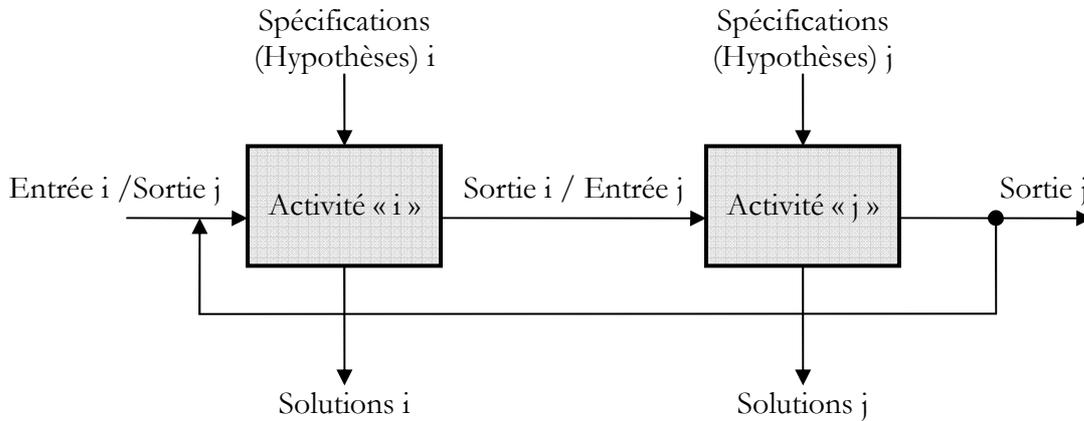


Figure 14- Des activités couplées

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de réaliser un ou plusieurs cycles itératifs. Les activités pouvant être exécutées en série ou en parallèle (Figure 15).

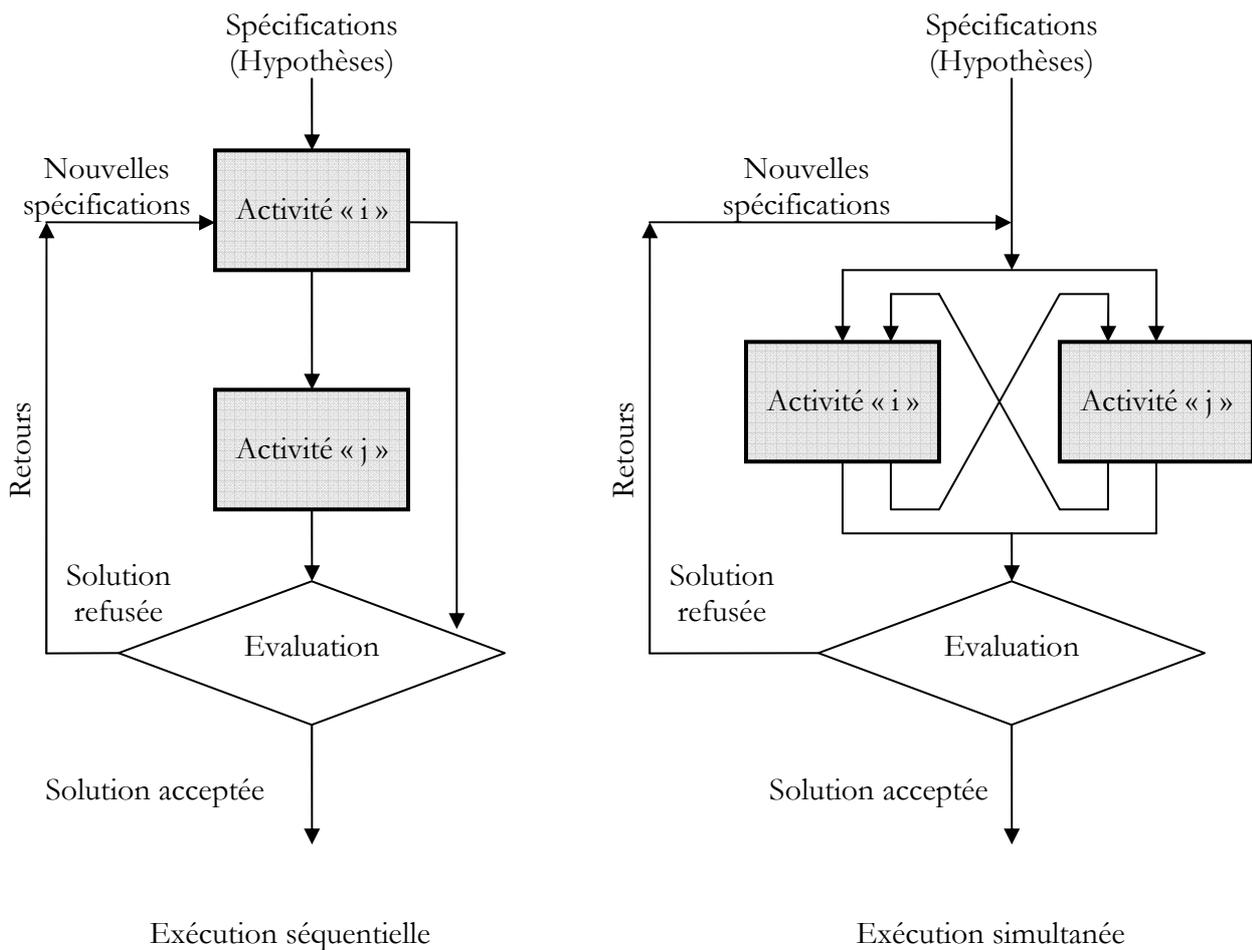


Figure 15- L'exécution d'activités couplées

Pour bien analyser les flux d'informations dans le processus de conception, il faut s'intéresser :

- aux données échangées et leur type ;

- à l'incohérence des données ;
- à la redondance des données ;
- à la disponibilité/indisponibilité des données.

L'analyse doit permettre de définir les **stratégies d'engagement des activités** de conception dans l'objectif de réduire le nombre d'itérations nécessaires à la résolution des problèmes de conception.

2.4 Synthèse et exemples d'indicateurs de performance

Nous venons de voir que les problèmes affectant la performance du processus de conception peuvent être de différentes natures. Nous pouvons associer chaque type de problème à différents indicateurs d'évaluation de performance. Nous donnons, dans le tableau suivant, une synthèse des critères d'efficacité et quelques exemples d'indicateurs de performance associés. Les indicateurs sont regroupés en fonction de la nature de l'objectif ou du critère de performance auquel ils correspondent [PERR 99].

	Critère d'efficacité	Exemples d'indicateurs	Objectif concerné
Sur le résultat de l'activité de conception	Coûts	<ul style="list-style-type: none"> Le coût de l'activité 	Réduire les coûts et investissements relatifs au développement et à l'introduction de nouveaux produits
	Qualité	<ul style="list-style-type: none"> Le produit de l'activité de conception satisfait-il la demande ? Le niveau de la qualité pour les produits d'activité La solution proposée est-elle bonne ? 	Améliorer l'attrait des nouveaux produits pour le consommateur ; Développer des produits qui soient faciles à fabriquer, à vendre, à installer ;
	Délais	<ul style="list-style-type: none"> La durée de l'activité 	Développer de nouveaux produits le plus vite possible.
Sur le Processus de conception		<p><u>les indicateurs quantitatifs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> Le nombre de retours sur les phases antérieures ; le nombre d'itérations ; le rapport entre le temps pour les itérations et le temps total pour la conception; <p><u>les indicateurs qualitatifs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> le type d'itérations : <ul style="list-style-type: none"> ○ changement et amélioration des solutions ; ○ problème d'intégration en fabrication ; ○ erreurs de conception ; ○ les interdépendances entre les activités de conception ; les sources d'itérations ; l'importance des itérations ; la phase où interviennent des itérations 	Développer des produits qui soient faciles à fabriquer, à vendre, à installer ; Développer de nouveaux produits le plus vite possible.
	Fluidité de l'enchaînement des phases du processus		
	Organisation (concernant la sous-traitance)	<ul style="list-style-type: none"> Le taux de sous-traitance (combien de fois le bureau d'études a fait appel à la sous-traitance ?) ; Le rôle de sous-traitance ; Saisie des temps passés pour chaque personne sur chaque activité 	Développer de nouveaux produits le plus vite possible. Réduire les coûts et investissements relatifs au développement et à l'introduction de nouveaux produits.
	Réactivité	<ul style="list-style-type: none"> Le délai de réaction 	Développer de nouveaux produits le plus vite possible
	Efficacité	<ul style="list-style-type: none"> L'adéquation entre la planification du processus de conception et le déroulement effectif du projet 	Développer de nouveaux produits le plus vite possible
	Informations	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilité/indisponibilité des données ; Redondance des données. 	Réduire les coûts et investissements relatifs au développement et à l'introduction de nouveaux produits
	Effort	<p>Utilisation des ressources :</p> <ul style="list-style-type: none"> humaines ; matérielles ; informatiques ; 	Réduire les coûts et investissements relatifs au développement et à l'introduction de nouveaux produits

Tableau 3- Exemples d'indicateurs de performance du Processus de Conception

2.5 Conclusions

Le processus de conception est devenu une source de compétitivité pour les entreprises. La gestion de ce processus est devenue de plus en plus difficile et complexe. Ceci est dû aux caractéristiques mêmes de la conception (complexe et dynamique) et aux changements qu'elle a connus ces dernières années dont nous avons exposé un certain nombre dans le premier chapitre. Cependant, **la maîtrise du processus de conception est incontournable** dans le contexte concurrentiel d'aujourd'hui. **Cette maîtrise passe par la capacité à évaluer ses performances.** Le travail présenté dans cette thèse a pour objectif de proposer une démarche d'évaluation des performances du processus de conception.

Pour évaluer le processus de conception, nous faisons, dans un premier temps, **l'hypothèse que sa performance est affectée par des problèmes de conception** d'ordre organisationnel, opérationnel et informationnel. A partir de là, nous proposons, en second lieu, de développer des indicateurs d'évaluation des performances en lien avec les types de problèmes identifiés.

A ce niveau, nous avançons une **deuxième hypothèse selon laquelle les problèmes affectant les performances du processus de conception peuvent être liés aux itérations** des tâches et activités de conception. A partir de là, nous proposons que les indicateurs de performance à développer soient articulés autour des itérations de conception.

Le fil directeur de notre travail porte ainsi sur l'étude et l'analyse des itérations en conception. Pour cela, nous proposons, dans le **troisième chapitre** de cette thèse, une **analyse qualitative des itérations.** Cette analyse est basée sur une étude théorique et bibliographique de la notion d'itérations en conception. Cette étude sera complétée, dans les **quatrième et cinquième chapitres**, par une **étude expérimentale des itérations.** L'objectif étant ici une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition des itérations et la quantification de ceux-ci dans un processus de conception. Le **sixième chapitre** sera consacré au **développement des indicateurs de performances** sur la base de l'analyse des itérations.

CHAPITRE 3

LES ITERATIONS DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

3 LES ITERATIONS DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter la notion d'itérations dans le processus de conception. Pour cela, nous présentons d'abord une brève description de la notion d'activité de conception et un modèle de cette dernière. Nous présentons ensuite les différents types de liens entre activités et tâches de conception. Ces liens modélisent, à la fois, les échanges d'informations entre les tâches de conception et les contraintes d'antériorité. Ces notions nous permettent ensuite de détailler le concept d'itérations en conception.

Une analyse qualitative des itérations sera ensuite présentée. L'objectif de cette analyse est d'aboutir à une première classification des itérations selon différents critères. Le but de la classification étant la mise en place de méthodes adéquates d'analyse et de traitements des itérations.

Les modèles existants pour la description du processus itératif en conception sont présentés et analysés. Cette analyse nous permet d'avoir une vision globale sur les modèles utilisés pour l'étude des itérations et d'adopter notre modèle d'analyse.

3.2 L'activité de conception

Dans leur démarche pour concevoir un produit, les concepteurs partent du fonctionnel vers le structurel. Tout au long de ce passage, ils proposent des solutions pour répondre aux besoins des utilisateurs. Ces solutions sont élaborées grâce à une succession d'activités qui permettront d'amener progressivement le produit vers son état final.

Nous appellerons « activité » tout ce que l'on peut décrire par des verbes dans le cycle de développement d'un produit, notamment le processus de conception (Figure 16).

Une activité est un ensemble de tâches élémentaires [DRAG 99], [CATT 04] :

- réalisées par un individu ou un groupe ;
- faisant appel à un savoir-faire spécifique ;
- homogènes du point de vue de leur comportement de performance (les mêmes facteurs influent positivement ou négativement sur leur performance) ;
- permettant de fournir un « output » bien précis, qu'il soit matériel ou immatériel ;
- pour un ou plusieurs clients identifiables, internes ou externes ;
- à partir d'un panel de ressources (temps de main-d'œuvre, temps d'équipements, énergie, données...).

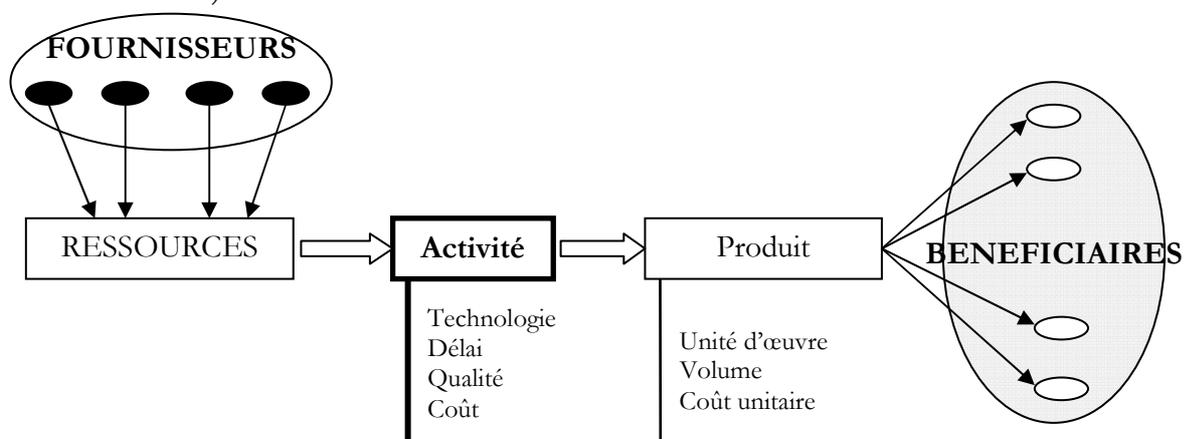


Figure 16- Notion d'activité

Une activité de conception est une unité du processus de conception dans le cadre de laquelle est réalisée une série de transformations et de processus (Figure 17). Les données initiales sont transformées pour obtenir un résultat conforme aux objectifs fixés et respectant les contraintes imposées. La complexité de l'activité dépend du processus de transformations des entrées et du niveau de décomposition (granularité de l'activité ou la tâche).

Les contraintes représentent les limites d'acceptation d'une solution. Généralement, elles sont exprimées par des relations entre les variables du processus de conception. Pour chaque activité du processus de conception, les contraintes doivent être impérativement respectées. Leur violation peut conduire à l'échec de l'activité où rend inacceptable la solution développée. Les objectifs représentent le résultat que vise l'activité exécutée par le concepteur ou pilotée par le décideur. Ils constituent une représentation anticipatrice de la performance à atteindre.

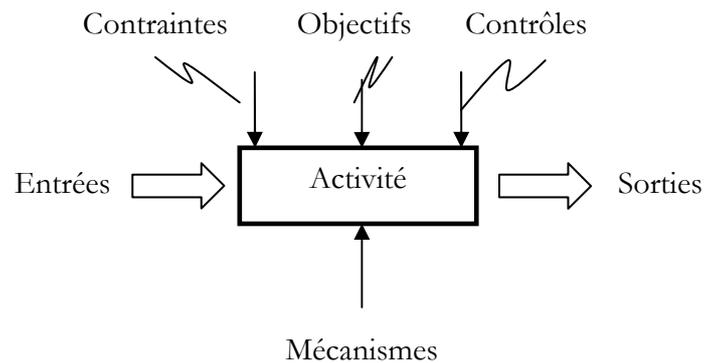


Figure 17- Module d'une activité de conception

3.3 Modèle de représentation de l'activité de conception

La littérature nous offre un large éventail de modèles de représentation des activités, notamment les activités de conception. Nous avons choisi, parmi ces modèles, un concept générique d'activité pouvant être utilisé pour la modélisation de la conduite des systèmes de production et pour la conduite des processus de conception [MEGA 99], [BOUD 00]. Ce concept de modélisation possède les caractéristiques suivantes (Figure 18) :

- c'est une représentation unique des processus composés d'activités, notamment de conception de produits. Il facilite la communication entre des acteurs de culture et de métiers différents ;
- chaque activité est identifiée par son nom, un code et un verbe qui va décrire son objectif, et sa durée de vie ;
- chaque processus et activité peut avoir l'état interne : inactif/actif, occupé/suspendu, terminé/abandonné et en attente ;
- cette représentation distingue trois types d'activité : les activités exécutoires, informationnelles et de sélection ;
- ce concept de modélisation d'activité identifie les compétences requises concernant les ressources (humaines et techniques), en fonction de leur disponibilité, pour l'exécution des activités ;
- il caractérise les indicateurs de performance (coûts, délais et qualité) requis et ceux effectivement utilisés, afin d'exprimer les contraintes et les objectifs à atteindre pour chaque processus et activité.

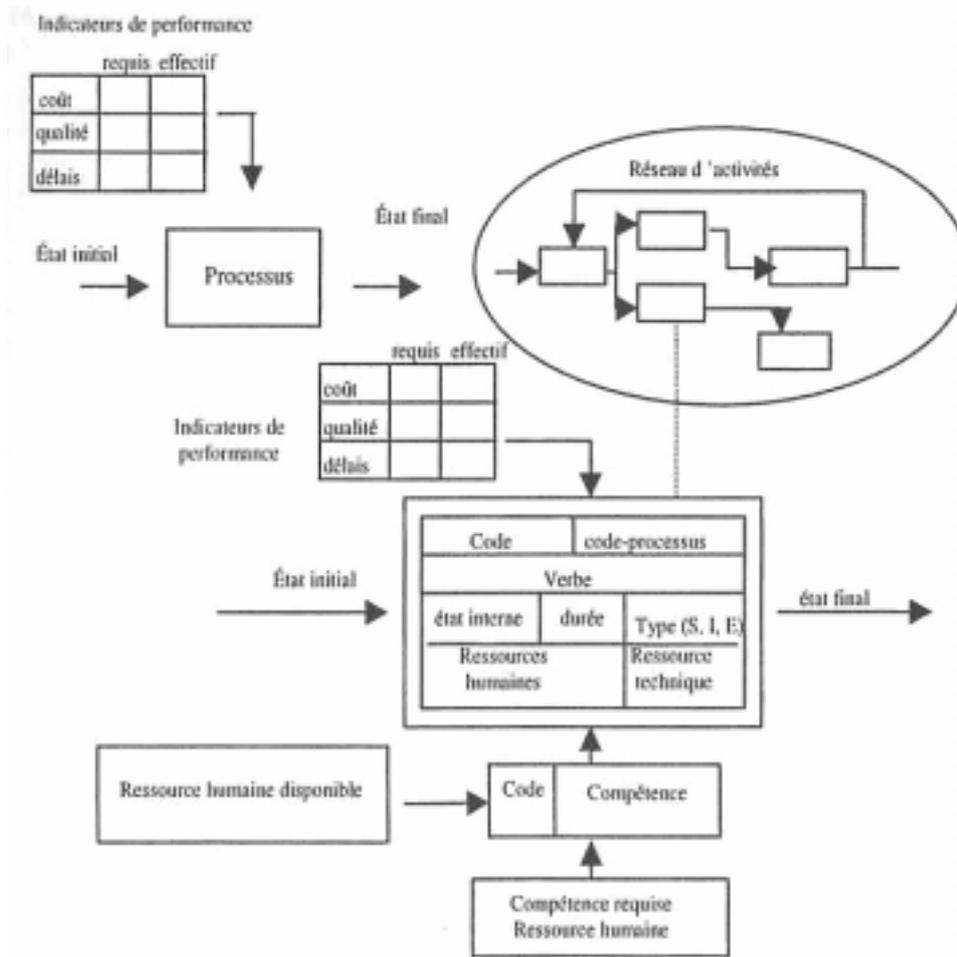


Figure 18- Concept générique de modélisation d'activité [MEGA 99]

Il est important, dans notre étude, de faire la différence entre les éléments requis (planifiés) et les éléments effectifs (réalisés) d'une activité. Ainsi, pour une activité donnée, nous aurons une durée planifiée et une durée réelle. La durée réelle correspond au travail nécessaire pour accomplir l'activité à laquelle on ajoute la durée passée sur les itérations. Parallèlement au calcul de la durée de l'activité, le coût sera calculé en fonction de l'effort fourni, qui est lui-même fonction du temps passé sur l'activité. Nous aurons ainsi, un coût relatif au travail nécessaire pour réaliser l'activité augmenté du coût requis pour les itérations. Cette distinction entre travail nécessaire et itérations sera utilisée pour construire nos indicateurs de performance.

3.4 Les types des liens entre les activités de conception

Pendant le déroulement du processus de conception, les concepteurs interviennent dans ses activités afin de résoudre des problèmes et développer des solutions. La fin d'une activité rend disponibles des données de sortie nécessaires au démarrage d'activités en aval. En conséquence, les activités de conceptions sont liées entre elles.

En fonction des dépendances informationnelles, on peut représenter trois types de liens entre les activités de conception. Considérant deux activités A et B, les trois types de liens sont les suivants (Figure 19) :

- Les activités **dépendantes** : ce sont les activités qui doivent être réalisées de façon séquentielle (pour commencer, l'activité B a besoin d'informations fournies par l'activité A).
- Les activités **indépendantes** (parallèles) : ce sont des activités qui n'échangent aucune information entre elles, mais qui sont dépendantes d'une autre activité et leurs sorties sont nécessaires pour une autre activité.

- Les activités **interdépendantes** (couplées) : elles sont mutuellement dépendantes (A a besoin d'informations fournies par B et B a besoin d'informations fournies par A). Dans ce cas un certain nombre d'itérations peut être nécessaire pour converger vers une solution acceptable.

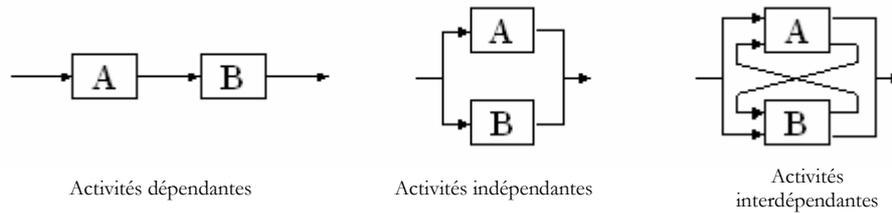


Figure 19- Les types d'activités en fonction de leurs dépendances

A partir de ces trois types de lien entre activités, l'exécution peut se faire selon différents scénarios possibles :

- Exécution **séquentielle** : ce type d'exécution est spécifique à l'ingénierie séquentielle (classique) où les activités sont enchaînées et sont exécutées une après l'autre par différentes équipes. Ce type d'exécution est facile à maîtriser, mais allonge les délais de conception.
- Exécution **en chevauchement** : l'exécution des activités en chevauchement peut être réalisée par la réorganisation des activités et par la constitution d'équipes multidisciplinaires qui peuvent intervenir dans plusieurs activités de conception tout au long du processus de conception. Ce type d'exécution peut se présenter sous deux formes différentes :
 - avec **transfert d'informations préliminaires**, le flux d'informations est unilatéral, spécifique plutôt à l'ingénierie séquentielle,
 - avec **échange réciproque d'informations**, le flux d'informations est bilatéral, spécifique à l'ingénierie simultanée.
- Exécution **simultanée** : dans ce cas, en fonction du lien entre les activités, deux schémas peuvent se présenter :
 - avec des activités indépendantes, l'exécution se fait sans échange d'informations,
 - avec des activités interdépendantes, l'exécution nécessite un échange d'informations entre les activités.

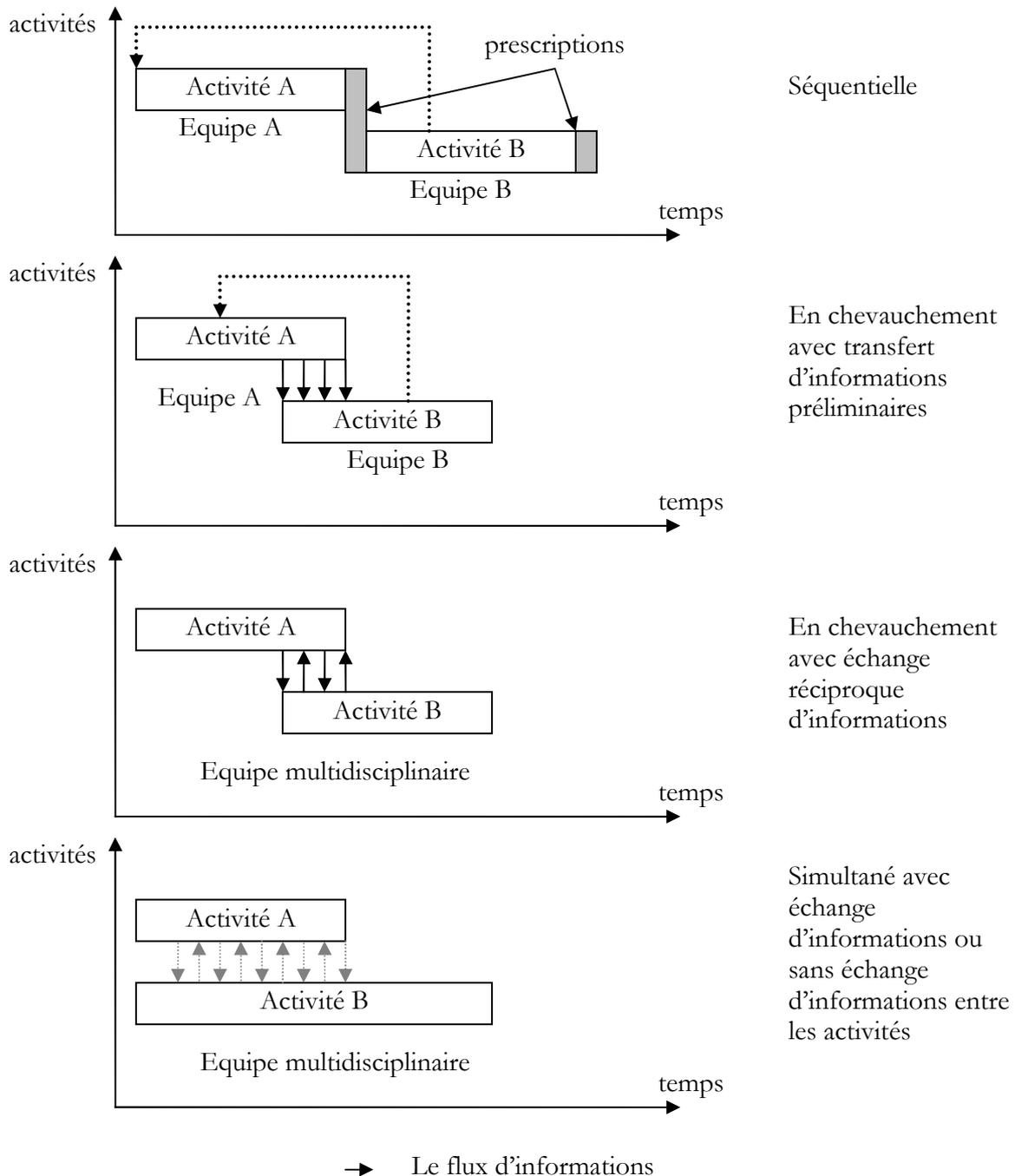


Figure 20- Les différents schémas d'exécution des activités

3.5 Les itérations en conception

3.5.1 Définition des itérations

De nombreux travaux de recherche ont abordé, de près ou de loin, le problème des itérations dans le processus de conception. En effet, celles-ci contribuent fortement dans l'allongement des délais de développement. *Osborne* [OSBO 92] rapporte que les itérations représentent entre 13% et 70% du temps total de développement pour les activités de conception de semi-conducteurs chez Intel. Il rapporte également que la variation des délais de développement est essentiellement due aux itérations.

On trouve différentes définitions des itérations dans la littérature. Un élément commun à ces définitions est le fait de considérer l'itération comme répétition des tâches de conception. Nous donnons ci-après quelques définitions, dont certaines sont tirées de la bibliographie.

Ulrich et Eppinger [ULRI 04] définissent formellement l'itération comme la répétition d'une tâche, déjà réalisée, pour introduire une nouvelle information. *Whitney* [WHIT 90] décrit les itérations en termes d'interactions entre les activités de conception.

Dans leur ouvrage, *Pahl et Beitz* [PAHL 96] décrivent le processus de conception comme une succession de phases. Ils définissent les itérations comme le processus par lequel une solution est approchée étape par étape. Elles ont lieu entre les différentes phases et souvent à l'intérieur même de chaque phase. Dans ce cas, les itérations permettent d'affiner une solution de conception. Cette procédure peut être assimilée à celle utilisée en mathématiques pour la résolution d'une équation ou d'un système d'équations en partant d'une solution initiale utilisée pour calculer une autre solution plus précise qui sera à son tour utilisée jusqu'à convergence vers une solution acceptable. Ce type d'itérations est souvent rencontré dans le cas d'activités de conception interdépendantes. Par exemple, pour réaliser l'activité C, on a besoin de connaître la valeur du paramètre y fourni par l'activité B. Pour calculer ce paramètre, l'activité B a besoin, à son tour, de la valeur du paramètre x fourni par l'activité A, mais celle-ci a besoin du résultat de l'activité C représenté par le paramètre Z . Dans ce cas, un processus itératif est nécessaire pour calculer tous les paramètres (Figure 21).

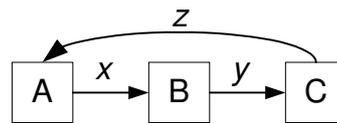


Figure 21- Exemple d'activités itératives

Une deuxième approche définit les itérations plus largement, comme un processus heuristique de raisonnement.

Ullman, Wood, et Craig [ULLM 90], définissent les itérations comme un processus cognitif que le concepteur emploie pour exécuter les activités qui changent l'état du processus de conception. *Bucciarelli* [BUCC 94] décrit les itérations en termes de négociation entre les spécialistes.

Tully [TULL 86] avance deux raisons pour lesquelles les itérations sont nécessaires : premièrement, il y a beaucoup d'interactions incomplètes qui doivent être résolues séquentiellement, cela prendrait plus de temps qu'une approche simultanée, même si l'approche simultanée induit une certaine itération. Deuxièmement, il y a des itérations imprévisibles à cause des erreurs de conception.

Les itérations peuvent aussi être influencées par la taille de l'équipe de conception. En effet, un groupe de taille importante peut être difficile à gérer [IDEL 02]. Dans ce cas, le nombre d'interactions que le travail commun peut engendrer nécessitera plus d'itérations pour résoudre les conflits entre les concepteurs.

En conclusion, les itérations représentent une caractéristique importante du processus de conception. Leur analyse est un facteur clé pour la compression des délais et des coûts de développement de produits. Il est donc important de développer des méthodes de traitement pour mettre en évidence ces itérations, par modélisation par exemple, puis d'en réduire les conséquences.

3.5.2 Les sources d'itérations

La première étape de notre analyse qualitative consiste en l'identification des origines des itérations dans la conception d'un produit. Nous en avons identifié trois : le changement d'objectifs, les erreurs de conception et l'interdépendance entre activités.

3.5.2.1 Le changement d'objectifs

Il s'agit, par exemple, des changements de spécifications du cahier des charges ou les changements de solutions de conception. Ce type d'itérations est également rencontré en ingénierie simultanée où certaines activités, travaillant en parallèle avec des activités amont, subissent des changements d'objectifs suite à une mise à jour des informations fournies par les activités amont.

3.5.2.2 Les erreurs de conception

Les itérations peuvent aussi avoir comme origine les erreurs de conception. Ces erreurs sont d'autant plus importantes que le processus de conception est de plus en plus complexe et qu'il implique de plus en plus de personnes, surtout dans un contexte d'ingénierie simultanée, où sont considérés en commun plusieurs métiers différents. *Kaminetzky* [KAMI 91] classe les erreurs humaines en erreurs de compréhension, erreurs de performances et erreurs d'intention. Plusieurs autres auteurs se sont intéressés à l'étude des erreurs de conception [USB 01], [COOK 02], [McMA 97], [STEW 92].

3.5.2.3 L'interdépendance entre activités

Il s'agit d'activités mutuellement dépendantes pour lesquelles plusieurs itérations sont nécessaires pour aboutir à une solution acceptable. Dans ce cas, le délai total du processus dépend souvent de l'ordonnement initial des activités de conception.

3.6 Typologie d'itérations

Les itérations peuvent être classées selon une typologie à plusieurs dimensions. Nous proposons une typologie avec quatre critères de classification.

3.6.1 Les itérations Courtes / Longues

Cette classification permet d'évaluer l'impact des itérations sur le délai et/ou le coût global des activités impliquées. Ceci nécessite une forme de quantification rattachée aux attributs des activités (durée, coût) ou aux nombres d'activités itérées. *Isaksson* [ISAK 00] rapporte qu'il est préférable d'avoir plusieurs courtes itérations qu'un nombre limité de longues itérations.

3.6.2 Les itérations Volontaires / Involontaires

La deuxième dimension de notre classification porte sur les itérations volontaires et les itérations involontaires. Les itérations volontaires sont dues aux activités interdépendantes et parfois aux changements d'objectifs. Les itérations involontaires sont essentiellement dues aux erreurs de conception. Cette classification permet de mieux prévoir les actions à entreprendre pour améliorer les performances du processus de conception. Pour cela, une première action consiste à minimiser les itérations involontaires car plus pénalisantes en termes de coûts et de délais de développement. Ceci exige, d'abord, une amélioration des procédures de travail de chaque activité puis d'avoir un système d'information robuste permettant de fournir aux activités des informations fiables et au bon moment. La deuxième action, permettant de compresser les délais du processus de conception, consiste en une meilleure gestion des itérations volontaires. Ceci implique une convergence rapide du processus itératif d'une part, et un nombre réduit de processus itératifs d'autre part. Plusieurs solutions permettent une convergence rapide des itérations : utilisation de système de CFAO permettant d'accélérer le travail des activités individuelles, utilisation d'outils de simulation permettant de réduire les temps nécessaires au prototypage et aux tests, l'amélioration de la coordination entre les équipes de développement, etc.

3.6.3 Les itérations Constructives / Exploratoires

Certaines itérations conduisent à des propositions ou des modifications concrètes des solutions de conception, mais pas toutes. Nous avons appelé itérations constructives, les itérations qui permettent de concrétiser les solutions proposées lors de l'itération. D'autre part, nous avons appelé itérations exploratoires les itérations qui se limitent seulement à l'étape d'exploration dans l'espace des solutions, sans pour autant produire des solutions concrètes et acceptables par les concepteurs. La présence d'un nombre élevé d'itérations exploratoires montre que les problèmes traités par les concepteurs ne sont pas bien connus. On les rencontre plus dans la conception innovante et la conception créative.

3.6.4 Les itérations Rapides / Lentes

Dans ce cas, il s'agit de la vitesse avec laquelle un processus itératif converge vers une solution acceptable. Cette vitesse est particulièrement influencée par les positions relatives des activités itérées dans le processus de conception. La réduction des processus itératifs peut être réalisée par une meilleure structuration des activités du processus de conception : découplage des activités interdépendantes, meilleur ordonnancement des activités de conception, réduction des délais de coordination entre les équipes de conception,.... Cependant, la réduction des processus itératifs peut augmenter le risque d'échec des solutions développées et doit donc être envisagée avec prudence.

3.7 Modélisation des itérations en conception : Etat de l'art

Pour une meilleure gestion des itérations dans le processus de conception, une modélisation de ce dernier est nécessaire. De nombreux modèles du processus de conception ont été développés dans la littérature. Plusieurs de ces modèles ne prennent pas en compte les itérations, d'autres les considèrent de manière implicite mais peu nombreux sont ceux qui les traitent explicitement. Parmi les méthodes de modélisation proposées, celle qui nous paraît la plus adaptée à l'analyse des itérations est la méthode DSM (Design Structure Matrix). Nous présentons, ci-après, les principes de cette méthode, puis quelques modèles de processus itératifs tirés de la bibliographie. Plusieurs de ces modèles sont basés sur la méthode DSM, d'autres utilisent la simulation.

3.7.1 La méthode DSM

DSM (Design Structure Matrix) est une méthode de modélisation et de gestion des activités du processus de conception. Elle est utilisée pour décrire les relations entrée/sortie entre les activités du processus de conception, montrant la structure du flux d'informations, dans un projet composé de plusieurs activités.

La méthode DSM repose sur une représentation matricielle pour décrire l'enchaînement des activités d'un projet et les relations entre celles-ci. L'utilisation de la représentation matricielle pour la modélisation des systèmes n'est pas récente. En effet, la méthode DSM a été introduite vers 1981 par *Steward* [STEW 81] comme méthode de gestion de la conception de systèmes complexes. A ses débuts, cette méthode ne servait qu'à représenter les relations de précédence entre les activités. Par la suite, elle a été reprise par nombre d'auteurs qui l'ont enrichi en ajoutant des mesures du degré de dépendance entre les activités ainsi que des mesures des durées et des coûts de ces activités.

Pour expliquer le principe de la méthode DSM, considérons l'exemple de la Figure 22.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	■			X							X
B		■		X							
C			■	X			X	X			
D				■							
E					■		X				
F						■		X	X		
G			X	X			■				
H								■			
I			X	X			X	X	■		
J										■	
K				X	X						■

Figure 22- Exemple d'une matrice DSM

La première ligne et la première colonne de la matrice représentent les activités du projet dans le même ordre. Chaque élément de la matrice (noté X dans notre exemple) indique que l'activité de la colonne correspondante fournit une entrée à l'activité de la ligne correspondante. Par exemple, le 'X' se trouvant dans l'intersection de la ligne G et de la colonne C, indique que l'activité G nécessite une information ou une entrée provenant de l'activité C.

Les éléments situés de part et d'autre de la diagonale n'ont pas la même signification. Considérons, dans notre exemple, que l'exécution des activités se fait dans l'ordre A jusqu'à K. Dans ce cas, les éléments situés dans la partie triangulaire inférieure représentent le flux d'informations fournies par les activités amont aux activités aval. Par contre, les éléments de la partie triangulaire supérieure indiquent un flux d'informations allant des activités aval vers les activités amont. Ce sont généralement des retours arrière ou des itérations. Ainsi, dans un modèle DSM, on peut représenter les trois types de liens entre activités que nous avons précédemment présentés (§3.4), à savoir : les activités dépendantes (ou en série), les activités indépendantes (ou en parallèle) et les activités interdépendantes (ou couplées). Le dernier type représente un processus itératif entre deux activités. Ces types de liens ainsi que leur représentation dans un modèle DSM sont montrés sur la Figure 23.

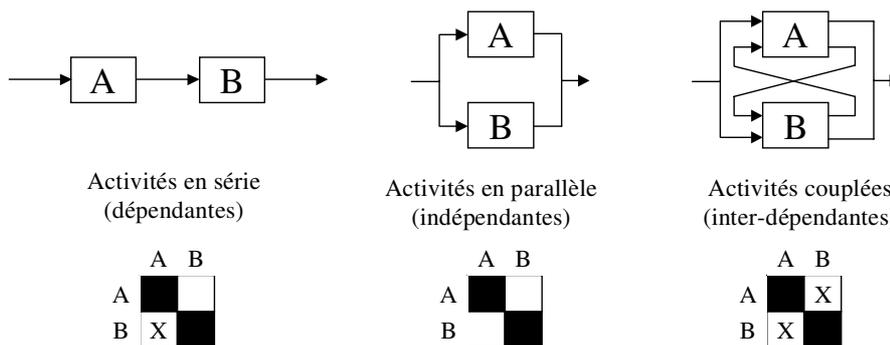


Figure 23- Représentation DSM de liens entre activités [Smith 92]

Puisque les éléments de la partie triangulaire supérieure de la matrice DSM représentent les retours arrière et les itérations dans le processus de conception, nous essaierons, en analysant la matrice, de réduire le nombre d'éléments dans cette partie. Si tous les éléments ne peuvent être éliminés, nous essaierons de les positionner le plus proche de la diagonale. En effet, un élément proche de la diagonale traduit un nombre réduit d'activités impliquées dans le processus itératif. Sur la Figure 24, nous montrons la même matrice de la Figure 22, mais réarrangée après l'analyse. Nous remarquons qu'on a peu d'éléments au dessus de la diagonale, ce qui traduit un nombre réduit d'itérations. De

plus, les éléments restant sont proches de la diagonale ce qui réduit le nombre d'activités impliquées dans les itérations et accélère le processus itératif.

	H	J	F	D	E	G	C	I	B	K	A
H	■										
J		■									
F	X	X	■								
D				■							
E					■	X					
G					X	■					
C				X		X	■	X			
I	X			X		X		■			
B				X					■		
K			X	X						■	
A				X						X	■

Figure 24- Matrice DSM réarrangée

Ainsi, il est possible de réorganiser la matrice DSM pour prescrire un ordonnancement d'activités et un plan de projet. En effet, dans plusieurs processus de conception, les itérations résultent d'un mauvais ordonnancement des activités dont les sorties ne sont pas disponibles dans les moments opportuns, pour les activités qui les requièrent. L'arrivée tardive de ces informations peut conduire à refaire des activités déjà terminées. Par ailleurs, les activités fortement couplées sont la cause des reprises d'activités et dans ce cas la convergence, par différentes équipes ou concepteurs indépendants, vers une solution acceptable ne peut s'obtenir que suite à plusieurs itérations. Connaître l'information produite et celle nécessaire pour chaque activité permet aux gestionnaires du processus de conception de mieux comprendre et de réduire les risques liés à la planification. Dans ce cas, la matrice DSM est un outil graphique d'analyse assez puissant. Le support permet également de visualiser les conséquences de divers ordonnancements et agencements d'activités.

La matrice DSM que nous avons présentée ici est une matrice binaire (les éléments sont des 'X' ou nuls). Plusieurs chercheurs ont travaillé sur des formes de quantification des éléments de la matrice. Nous présentons, dans le paragraphe suivant, quelques modèles intégrant la représentation des processus itératifs. Certains de ces modèles utilisent, comme base de représentation, la méthode DSM.

3.7.2 Autres modèles

3.7.2.1 Modèles basés sur la méthode DSM

Depuis son apparition, la méthode DSM a fait l'objet de différentes améliorations et modifications pour l'adapter à la modélisation du processus de conception. Nous présentons ici quelques uns de ces modèles.

Travaux de Smith et Eppinger

Smith et Eppinger [SMIT 92] [SMIT 97a] ont étudié l'impact de la structure du processus de conception sur l'ordonnancement des activités du processus. Ils ont proposé un modèle d'ordonnancement des activités de conception basé sur la méthode DSM. Le modèle ne considère que les processus séquentiels avec présence d'itérations. Chaque activité du modèle est supposée être de durée fixe avec une probabilité d'itération constante. L'utilisation du modèle permet de calculer la durée totale d'un processus séquentiel et itératif de conception et de suggérer un ordonnancement

initial de ses activités permettant de minimiser cette durée. Suite aux résultats obtenus, les auteurs ont proposé deux principales recommandations pour diminuer les délais des cycles de conception :

- il est préférable d’avoir les activités de courte durée en début du processus de conception,
- il est recommandé d’avoir les grandes probabilités d’itération dans la partie triangulaire inférieure de la matrice DSM (les éléments se trouvant dans la partie triangulaire supérieure d’une matrice DSM représentent des remises en cause).

Ce modèle présente quelques limitations dues essentiellement aux hypothèses concernant la durée des activités et les probabilités d’itération qui sont supposées connues et constantes. Dans une autre étude [SMIT 97b], une extension de ce modèle a été proposée par les auteurs afin de supprimer certaines de ces limitations. Cette nouvelle extension permet aussi de considérer l’exécution en parallèle de plusieurs activités.

Travaux de Kusiak

Kusiak et al. ont élaboré différentes méthodes formelles pour la décomposition et l’organisation des activités de conception afin de mener celles-ci en parallèle. Ces travaux sont inspirés des techniques de technologie de groupe appliquées aux systèmes de production, basées sur une représentation matricielle des activités de conception. Les auteurs proposent des algorithmes permettant de structurer les matrices pour faire apparaître des groupes d’activités indépendants, donc, pouvant être planifiés en parallèle. Deux types de matrices sont représentés. Dans [KUSI 93], il s’agit d’une matrice activité-activité dont les éléments représentent les liens de précédence entre les activités. C’est la représentation DSM classique. Dans [KUSI 90], il s’agit d’une matrice activité-module où les éléments représentent les activités nécessaires à la conception de chaque module. La matrice est alors réorganisée, en utilisant un algorithme de structuration, pour identifier des groupes d’activités séparables, donc découplés. La matrice structurée peut contenir des activités communes à différents groupes. Pour parfaire les regroupements, on introduit des ressources supplémentaires permettant de réaliser les activités correspondantes dans chaque groupe séparément. Ainsi, ces groupes peuvent être planifiés et menés en parallèle.

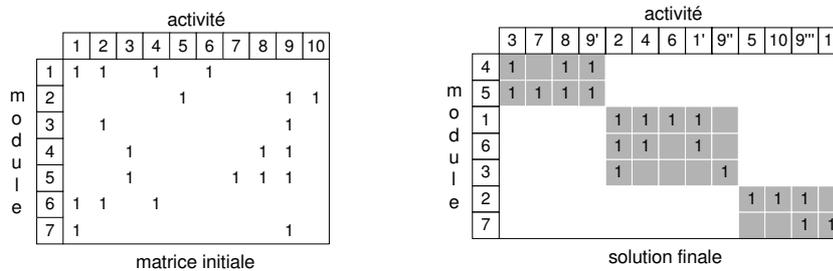


Figure 25- Une matrice Modules-Activités

Autres travaux

Plusieurs auteurs ont proposé des outils et des algorithmes permettant de réarranger les éléments de la matrice DSM afin de réduire les itérations au sein des activités du projet. *Rogers* [ROGE 97] propose l’outil DeMAID basé sur les algorithmes génétiques. *Dong* [DONG 92] propose une macro sous Microsoft Excel permettant de réarranger la matrice DSM afin de minimiser les itérations. *Carrascosa* [CARR 98] a développé un modèle, basé sur la méthode DSM, permettant d’estimer la probabilité de réalisation d’un projet à partir d’une quantification des liens entre les activités. Le modèle fournit une base pour déterminer l’ordre de tâche et le degré approprié de simultanéité pour réduire au minimum le temps et le coût de conception.

3.7.2.2 Modèles basés sur la simulation

On trouve aussi dans la littérature des modèles de simulation de processus applicables à la conception. Ces modèles intègrent la notion d'itération en permettant de refaire des activités déjà exécutées. L'objectif de tels modèles est de déterminer le paramétrage optimal du réseau d'activités pour obtenir les meilleures performances du processus étudié.

Travaux de Ramat

Ramat *et al.* [RAMA 97] ont développé l'outil RAIH (Réseau d'Activités Incertaines Hiérarchisées) pour la modélisation et la planification de projets complexes. Cet outil est basé sur une extension du modèle GAN (*Generalized Activity Network*) développé par Elmaghraby [ELMA 70] enrichi d'une sémantique liée à la notion d'incertitude, d'une structuration hiérarchique et de règles de réduction adaptées. Chaque projet est constitué de deux types d'activités :

- **l'activité incertaine** : l'activité peut réussir ou échouer. D'après la notation du modèle GAN, ce type d'activité est représenté par deux arcs et trois sommets. Le premier sommet représente l'activation de l'activité et est composé d'un récepteur (a priori, tous les prédécesseurs de l'activité doivent être achevés avant que l'activité puisse commencer) et d'un émetteur « Ou ». Ce dernier sert à représenter explicitement les deux cas de figure possibles de l'activité (réussite et échec) par l'intermédiaire des deux arcs. Chaque arc est caractérisé par deux paramètres : la durée de l'activité (en cas de réussite ou en cas d'échec) et la probabilité d'occurrence (probabilité que l'activité échoue ou réussisse). Les deux sommets restants représentent les événements « fin en cas d'échec » et « fin en cas de réussite ».
- **l'activité certaine** : l'activité certaine est définie par une durée (variable aléatoire) et une probabilité d'occurrence égale à 1.

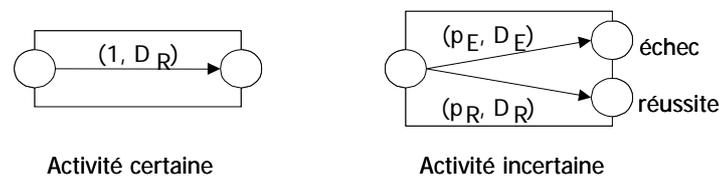


Figure 26- Activités du modèle RAIH

Ce modèle permet d'analyser le comportement probable d'un projet en générant des indicateurs pertinents, comparables à ceux de la méthode PERT (date de début, date de fin,...). La différence réside dans le fait que le modèle RAIH a la capacité de prendre en compte et de représenter l'incertitude par les alternatives « échec » et « succès ». Il permet ainsi d'intégrer les itérations d'activités.

Travaux de Liu

Le modèle proposé par Liu *et al.* [LIU 97] concerne l'ordonnancement des activités de conception. Les caractéristiques principales de ce modèle sont :

- la prise en compte des itérations : chaque activité de conception est assujettie à un nombre incertain d'itérations,
- la prise en compte des contraintes de ressource : ce point devient crucial quand il faut gérer simultanément plusieurs projets de conception avec un nombre fini de ressources,
- la prise en compte du risque d'échec du projet de conception en termes de délai et de nombre d'itérations.

Le modèle d'ordonnancement est formulé sous la forme d'un problème d'optimisation. L'objectif de l'ordonnancement est de respecter le délai de réalisation du projet tout en évitant de commencer les activités de conception plus tôt que nécessaire ainsi que de réduire les risques d'échec. La fonction objectif consiste donc à minimiser les retards, les avances et les risques d'échec des projets en

choisissant, pour chaque activité de conception, la date de début adéquate et l'ensemble de ressources nécessaires. Des méthodes de programmation dynamique ont été utilisées comme cadre de résolution du problème.

L'une des limites de ce modèle repose dans le fait qu'il ne s'intéresse pas aux mécanismes de décomposition du projet de conception en sous-projets puis en tâches élémentaires. De plus, si le nombre d'itérations est pris comme incertain, les durées des projets et des activités sont considérées comme déterministes. Nous avons remarqué aussi qu'il n'y a pas de différenciation, en termes d'importance, entre les différents projets conduits simultanément.

Travaux de Boudouh

Boudouh [BOUD 02] propose un support de simulation, désigné SRCDP (Simulateur de Réseaux d'activités du Cycle de Développement de Produit), qui permet d'évaluer quantitativement les "performances" du réseau d'activités en fonctionnement perturbé. Cet outil de simulation prolonge un outil de modélisation basé sur les principes d'analyse structurée de l'approche fonctionnelle désigné, lui, TMCDP (modèle Technique et de Management du CDP). Cet outil a la particularité d'intégrer, dans une représentation homogène et cohérente, les aspects techniques du CDP et ceux des modes de gestion sous-jacents. La démarche de simulation consiste à établir, d'abord, le modèle TMCDP de la situation à analyser. Ce modèle sera ensuite étendu, pour un niveau de décomposition choisi, à un modèle de simulation en se servant du formalisme IDEF3. Les réseaux de simulation sont composés de trois entités de base : les activités, les liens entre ces activités et les connecteurs. Le simulateur réalisé permet d'appréhender une grande diversité de situations. Les résultats qu'il fournit permettent d'établir des indicateurs significatifs sur lesquels peut être validée l'application des principes d'ingénierie concurrente (parallélisme, chevauchement, etc.).

3.7.3 L'Algorithme de diagonalisation de la matrice DSM

C'est une méthode d'analyse utilisée pour organiser et séquencer les activités en fonction des contraintes d'antériorité. Le but est de limiter au maximum la présence d'éléments "X" au-dessus de la diagonale de la matrice DSM. Ceci permet de réduire les cycles itératifs dans le processus.

Le processus de partitionnement consiste à réarranger la matrice DSM initiale en intervertissant les lignes et les colonnes correspondantes, de façon à trouver une séquence qui optimise les flux d'échanges, c'est-à-dire qui permettent aux acteurs de travailler sur des informations valides. L'ordonnancement est défini par la recherche de circuits dans la matrice. La méthode est basée sur la théorie des graphes et consiste à identifier les composantes fortement connexes à l'intérieur de la matrice DSM.

Nous présentons, dans cette partie, un algorithme de diagonalisation de la matrice DSM. La présentation est accompagnée d'un exemple d'illustration appliqué au processus de la Figure 27 (l'exemple a été simplifié pour faciliter la présentation de l'algorithme).

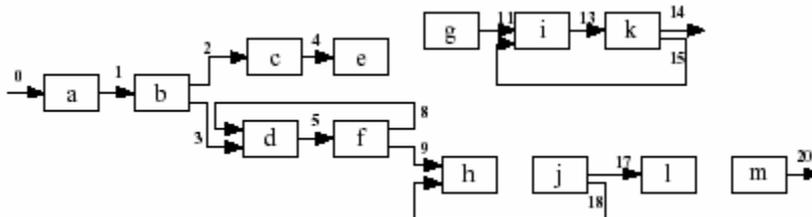


Figure 27- Exemple du processus de conception

Les activités sont désignées par les lettres de *a* à *m*. Les entrées et les sorties sont représentées par les chiffres de *0* à *20*.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
a	■												
b	X	■											
c		X	■										
d		X		■		X							
e			X		■								
f				X		■							
g							■						
h						X		■		X			
i							X		■		X		
j										■			
k									X		■		
l										X		■	
m													■

Figure 28- La représentation DSM du processus de conception

Pour diagonaliser la matrice DSM, les notions suivantes seront définies :

- **L'activité d'origine (OA)** : c'est une activité indépendante des autres (une activité qui n'a pas besoin d'informations fournies par d'autres activités). Sur la Figure 27 les activités *a*, *g*, *j* et *m* sont des activités d'origine.
- **L'activité de destination (DA)** : c'est une activité qui a besoin d'informations fournies par une ou plusieurs activités, mais elle ne fournit pas d'informations à d'autres activités. Sur la Figure 27 les activités *e*, *h* et *l* sont des activités de destination.

L'algorithme de diagonalisation :

DEBUT (avec les activités dans l'ordre initiale) ;

Etape 1 : identifier les activités d'origine (OA) ou les activités de destination (DA). Aller à l'étape 5 si aucune activité OA ou DA n'a été trouvée ;

Etape 2 : marquer les lignes associées aux activités d'origine (OA) et les colonnes associées aux activités de destination (DA), identifiées dans la 1^{ère} étape ;

Etape 3 : appliquer la « Règle de sélection » aux activités identifiées dans la 1^{ère} étape ;

Etape 4 : effacer les lignes et les colonnes correspondantes aux activités identifiées dans la 1^{ère} étape et appliquer à la nouvelle matrice constituée des activités restantes, l'étape 1 ;

Etape 5 : trouver un cycle et aller à l'étape 6. Si non, aller à l'étape 7 ;

Etape 6 : fusionner toute les activités d'un cycle dans une seule en fusionnant les lignes et les colonnes correspondantes et aller à l'étape 1 ;

Etape 7 : donner des niveaux de précedence pour les activités et les cycles, dans la solution finale ;

FIN.

Règle de sélection :

Si l'activité est une activité d'origine (OA), déplacez-la à gauche par rapport aux activités qui ne sont pas dans la liste des activités d'origine.

Si l'activité est une activité de destination (DA), déplacez-la à droite par rapport aux activités qui ne sont pas dans la liste des activités de destination.

Exemple d'application:

DEBUT (avec les activités dans l'ordre initiale).

Les activités sont : {a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m}.

Etape 1 : identifier les activités d'origine (OA) ou les activités de destination (DA).

Les activités d'origine (OA) sont : {a, g, j, m} ; Les activités de destination (DA) sont : {e, l, h}.

Dans la liste des activités retenues, nous avons {a, g, j, m, e, l, h}, hors de la liste {b, c, d, f, g, i, k}.

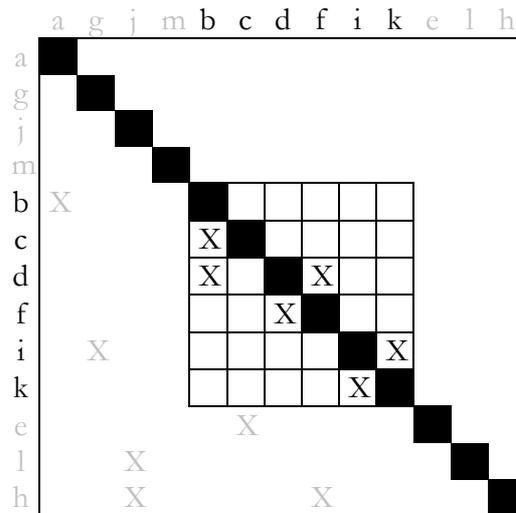
Etape 2 : marquer les lignes associées aux activités d'origine (OA) et les colonnes associées aux activités de destination (DA), identifiées dans la 1ère étape.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
a	■				■								
b	X	■											
c		X	■										
d		X		■		X							
e			X		■								
f				X		■							
g							■						
h						X		■		X			
i						X			■		X		
j										■			
k									X		■		
l										X		■	
m													■

Etape 3 : appliquer la « Règle de sélection » aux activités identifiées dans la 1^{ère} étape : réarrangement de la matrice.

	a	g	j	m	b	c	d	f	i	k	e	l	h
a	■												
g		■											
j			■										
m				■									
b	X				■								
c					X	■							
d					X		■	X					
f							X	■					
i	X								■	X			
k									X	■			
e						X					■		
l			X									■	
h			X				X						■

Etape 4 : effacer les lignes et les colonnes correspondantes aux activités identifiées dans la 1^{ère} étape et aller à l'étape 1.

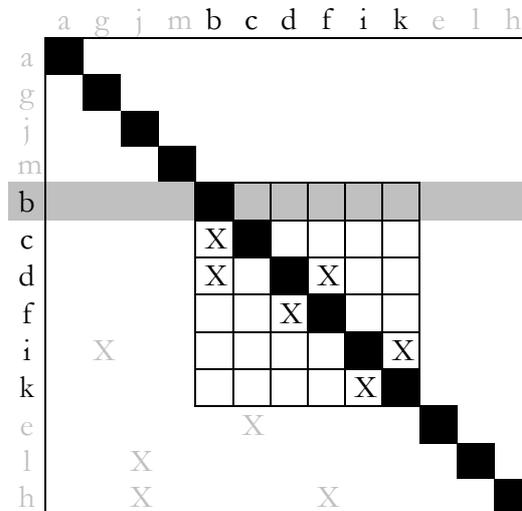


Etape 1 : identifier les activités d'origine (OA) ou les activités de destination (DA).

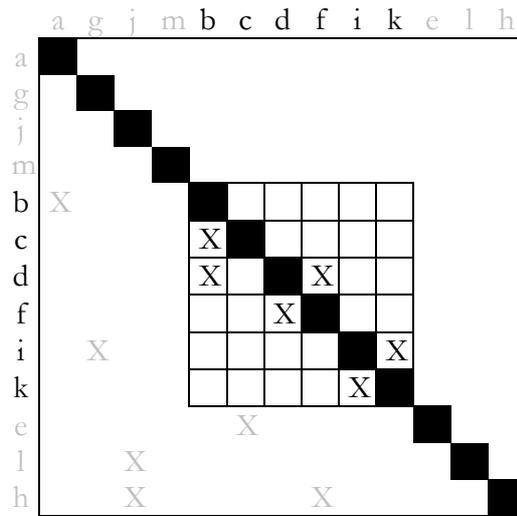
L'activité d'origine (OA) est : {b}.

Dans la liste des activités retenues, nous avons {b}, hors de la liste {c, d, f, i, k}.

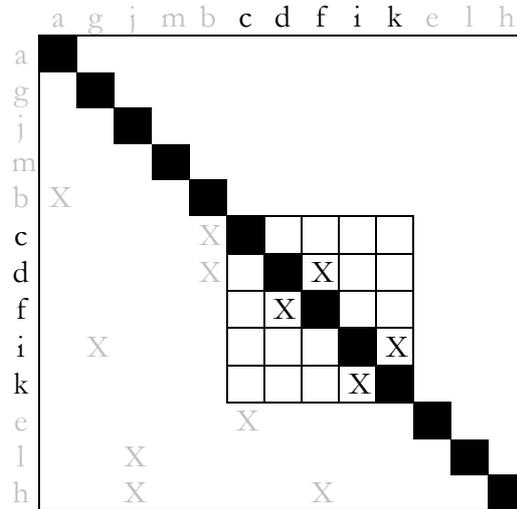
Etape 2 : marquer la ligne associée à l'activité d'origine (OA), identifiée dans la 1^{ère} étape.



Etape 3 : appliquer la « Règle de sélection » aux activités identifiées dans la 1^{ère} étape : réarrangement de la matrice.



Etape 4 : effacer les lignes et les colonnes correspondantes à l'activité identifiée dans la 1^{ère} étape et aller à l'étape 1.

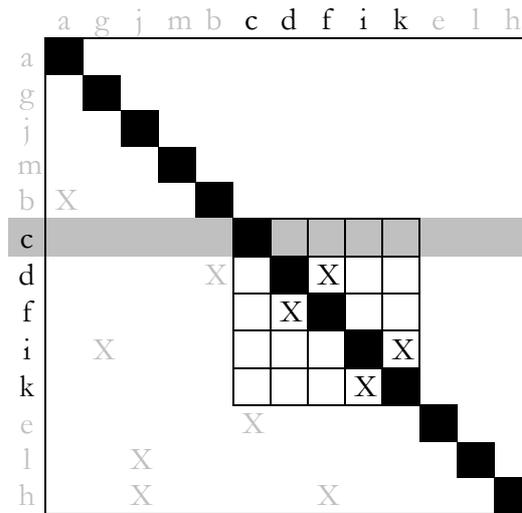


Etape 1 : identifier les activités d'origine (OA) ou les activités de destination (DA).

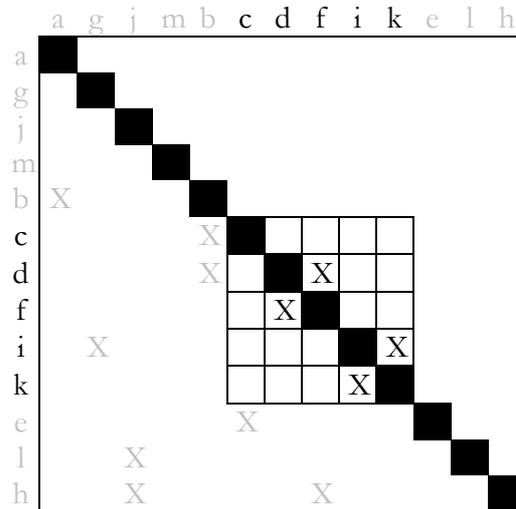
L'activité d'origine (OA) est : {c}.

Dans la liste des activités retenues, nous avons {c}, hors de la liste {d, f, i, k}.

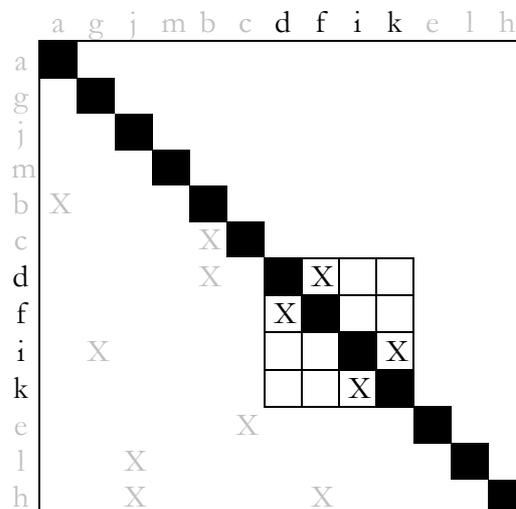
Etape 2 : marquer la ligne associée à l'activité d'origine (OA), identifiée dans la 1^{ère} étape.



Etape 3 : appliquer la « Règle de sélection » aux activités identifiées dans la 1^{ère} étape : réarrangement de la matrice.



Etape 4 : effacer les lignes et les colonnes correspondantes à l'activité identifiée dans la 1^{ère} étape et aller à l'étape 1.



Etape 1 : aller à l'étape 5 si aucune activité OA ou DA n'a été trouvée.

Etape 5 : trouver un cycle.

Les cycles sont $C1 = \{d, f\}$ et $C2 = \{i, k\}$, voir la Figure 29.

	d	f	i	k
d		X		
f	X			
i				X
k			X	

Figure 29- Les cycles dans la matrice DSM

Etape 6 : fusionner toute les activités d'un cycle dans une seule en fusionnant les lignes et les colonnes correspondantes et aller à l'étape 1.

	a	g	j	m	b	c	C1	C2	e	l	h
a											
g											
j											
m											
b	X										
c					X						
C1					X						
C2		X									
e						X					
l			X								
h			X				X				

Figure 30- La matrice DSM réarrangée en forme finale

Etape 1 : aller à l'étape 5 si aucune activité OA ou DA n'a été trouvée.

Dans la liste $\{a, g, j, m, b, c, C1, C2, e, l, h\}$, hors de la liste $\{\}$.

Etape 5 : si n'est pas trouvé un cycle, aller à l'étape 7.

Etape 7 : donner des niveaux de précedence pour les activités et les cycles, dans la solution finale.

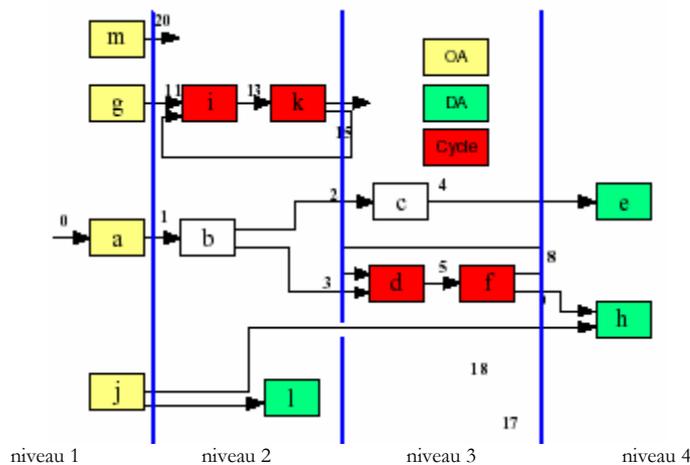


Figure 31- Représentation des niveaux de précedence

Activité / Cycle	Niveau	a	g	j	m	C2	b	l	C1	c	e	h
a	1	■										
g			■									
j				■								
m					■							
C2	2		X			■						
b		X					■					
l				X				■				
C1	3						X		■			
c							X			■		
e	4									X	■	
h				X					X			■

Figure 32- Ordonnancement des activités par les niveaux de précedence

3.8 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude détaillée sur les itérations dans le processus de conception. Nous avons d'abord présenté la notion d'activité de conception en se basant sur un modèle générique. Dans ce modèle, des éléments de l'activité de conception sont mis en évidence : les entrées et sorties, les objectifs, les contraintes, les contrôles ainsi que les mécanismes. A ces éléments, on attache d'autres paramètres tels que la durée de l'activité et son coût, nécessaires pour l'évaluation de l'activité.

Après la présentation de la notion d'activité, les différents types de liens entre les activités de conception ont été recensés. En fonction de ces différents types de liens, nous avons analysé les modalités de transfert d'informations entre les activités.

Après cette caractérisation des flux d'informations entre les activités de conception, nous avons abordé la notion d'itérations avec plus de détails. Une première analyse qualitative des itérations nous a permis d'identifier les sources de celles-ci : les changements d'objectifs, les erreurs de conception et l'interdépendance des activités. Une caractérisation des itérations nous a permis ensuite de proposer une typologie des itérations. Plusieurs critères de classification ont été utilisés dans cette typologie : les itérations courtes / longues ; les itérations volontaires / involontaires ; les itérations constructives / exploratoires ; les itérations rapides / lentes.

Afin de préparer l'analyse quantitative des itérations, nous avons présenté les modèles de description des processus itératifs. La méthode DSM (*Design Structure Matrix*) se présente aujourd'hui comme le moyen le plus efficace pour modéliser les itérations dans le processus de conception. Un état de l'art nous a permis d'étudier les modèles proposés dans la littérature. Un grand nombre de ces modèles est basé sur la méthode DSM. D'autres modèles, utilisant la simulation, ont été également revus. Dans la suite de ce travail, nous nous baserons sur la méthode DSM pour analyser les itérations en conception. L'avantage de la méthode DSM est le fait de pouvoir appliquer des algorithmes de réarrangement de la matrice pour obtenir un ordonnancement des activités minimisant les itérations dans le processus étudié. Cependant, cette méthode ne permet pas d'évaluer la performance intrinsèque du processus de conception étudié. En effet, sa faiblesse est de ne s'attacher à trouver ni la durée globale du projet, ni la durée de chaque activité. L'analyse obtenue est alors purement qualitative. Dans l'Annexe 1 sont présentés deux modèles basés sur la méthode DSM qui permettent d'évaluer la durée et la charge d'une activité de conception et aussi la durée globale du projet.

CHAPITRE 4

L'UTILISATION DE L'EXPERIMENTATION EN CONCEPTION

4 L'UTILISATION DE L'EXPERIMENTATION EN CONCEPTION

4.1 Introduction

La simulation des processus de conception est un moyen utilisé par les laboratoires de recherche pour obtenir des informations sur leur comportement et sur la variation de leurs paramètres, en fonction des différents facteurs de nature interne ou externe au processus. L'expérimentation s'inscrit, généralement, dans une démarche globale de recherche sur la conception. Nous présentons, dans ce chapitre, deux démarches de recherche en conception : DRM (*Design Research Methodology*) proposée par *Blessing* et al. et le cycle de recherche adopté dans notre équipe de recherche (CID) au laboratoire M3M de l'UTBM. Cette première étape nous permettra d'asseoir notre démarche de recherche dans cette thèse.

Nous présentons, dans un deuxième temps, les expériences utilisées dans ce travail. Trois expériences ont été étudiées. La première concerne la re-conception d'un produit par une équipe de quatre concepteurs travaillant en présentiel. La deuxième expérience a mobilisé également quatre concepteurs, mais travaillant à distance en synchrone et en asynchrone. La dernière expérience a porté sur la conception d'un produit en présentiel par trois acteurs. Nous détaillons dans ce chapitre la spécificité et les conditions de réalisation de chacune de ces expériences. L'analyse des résultats des expériences sera présentée dans le chapitre 5.

4.2 Démarche générale de recherche

La conception est une activité complexe. Elle est caractérisée par des aspects techniques, humains, opérationnels, organisationnels, économiques, etc. Chacun de ces aspects peut être étudié en utilisant des méthodes de recherche appropriées. La recherche en conception est une discipline relativement récente. Plusieurs méthodologies de recherche sur la conception de produits ont été proposées par différents chercheurs. Notre démarche de recherche a été inspirée de deux méthodologies existantes : le DRM (*Design Research Methodology*) [BLES 01] et le cycle de recherche CID [CHOU 04]. Nous présentons ces deux méthodologies ci-après avant de détailler la méthode de travail que nous avons adoptée.

En plus, ces aspects sont liés entre eux. Prenant en compte ces caractéristiques, plusieurs méthodes globales de recherche en conception ont été développées.

Pour notre travail, nous avons adopté la méthodologie de recherche DRM (Design Research Methodology) développée par *Blessing* et le Cycle de Recherche de l'équipe *CID* (*Conception Innovante et Distribuée*) du Laboratoire M3M de l'UTBM.

4.2.1 Design Research Methodology

La méthodologie globale de recherche en conception selon *Blessing* [BLES 01], voir la Figure 33, a les étapes suivantes :

1. Formulation des critères de succès/insuccès ;
2. Première étude descriptive ;
3. Etude prescriptive ;
4. Seconde étude descriptive.

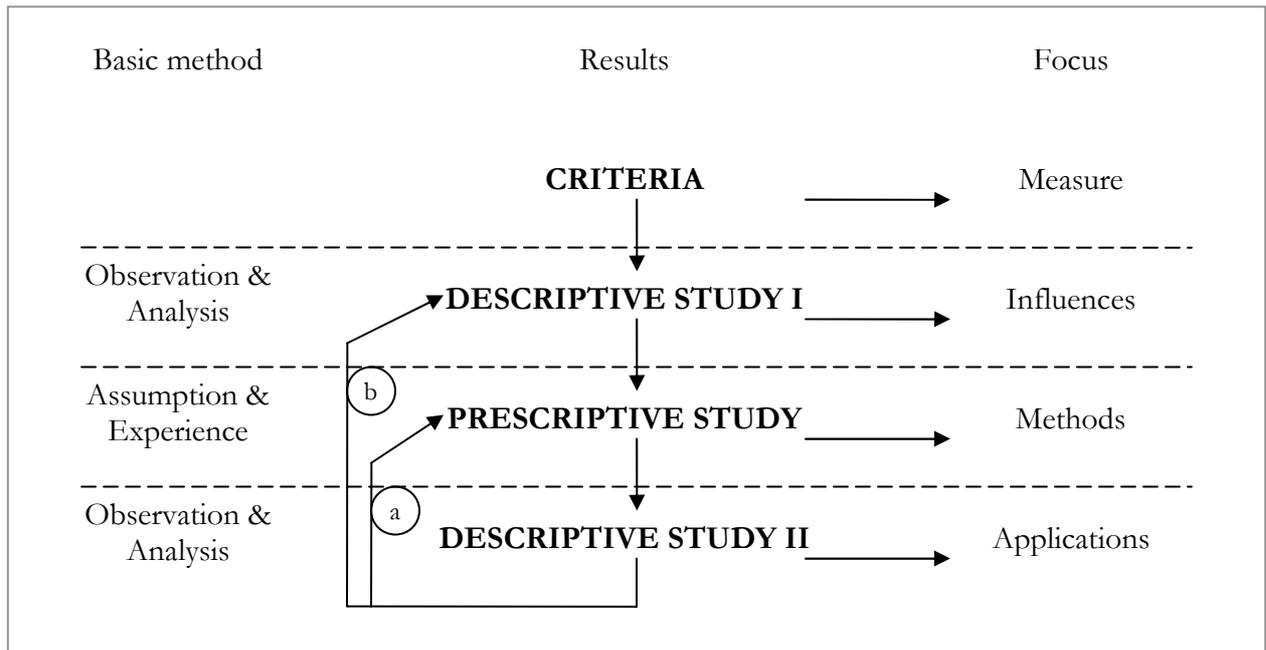


Figure 33- Design Research Methodology [BLES 01]

Dans la première étape de la méthode, *formulation des critères de succès/insuccès*, on identifie les objectifs à atteindre par le travail de recherche à mener. On définit également des *critères mesurables* qui permettent d'apprécier le degré de réalisation des objectifs. Cette étape est suivie d'une *première étude descriptive* qui sert à déterminer les *facteurs* qui influencent les critères définis.

Partant du résultat de l'étape précédente, l'étape de *l'étude prescriptive* a pour objet de prescrire des modèles, méthodes et outils pour améliorer le processus étudié. Enfin, dans l'étape de la *seconde étude descriptive*, on valide les résultats des premières étapes. D'une part, on évalue la qualité des prescriptions proposées à un niveau opérationnel (a) et, d'autre part, on évalue l'impact de ces prescriptions sur les critères préalablement choisis (b).

4.2.2 Cycle de recherche CID

La démarche de recherche se structure autour d'un cycle qui va de l'expérimentation en laboratoire ou sur des terrains industriels jusqu'au développement et au transfert des outils développés.

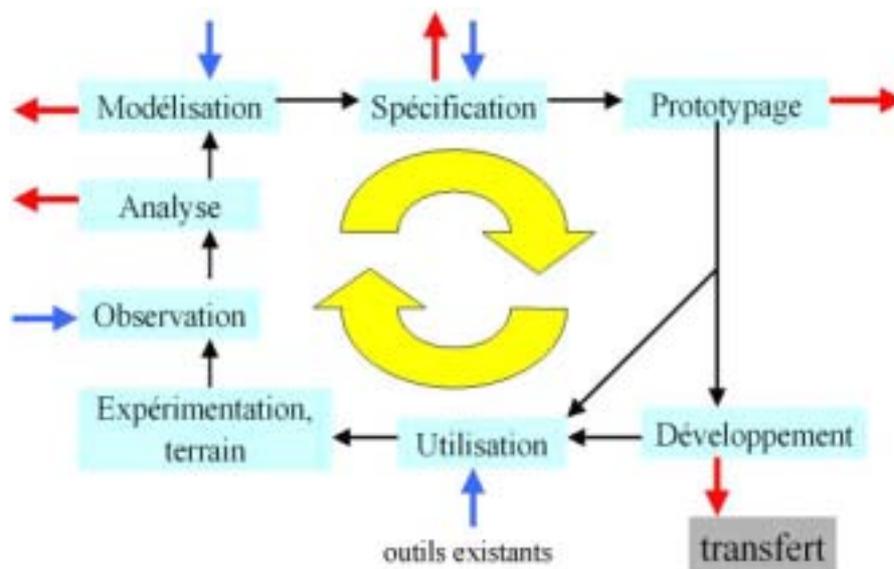


Figure 34- Cycle de recherche CID [CHOU 04]

Partant d'observations de la conception en situation réelle ou expérimentale, des corpus sont recueillis et analysés à l'aide de modèles. Les modèles sont utilisés pour spécifier des méthodes et des outils adaptés au déroulement du processus de conception ou au comportement cognitif, communicationnel ou instrumental des concepteurs.

Ce modèle a deux objectifs : la production des connaissances et la production d'outils. Les connaissances sont nécessaires pour mieux comprendre les différentes situations rencontrées dans la conception : le comportement des concepteurs, l'émergence des solutions, l'émergence des objets intermédiaires, les interactions entre les concepteurs, les influences d'outils de calcul ou de communication sur le déroulement du processus de conception, etc.

Pour faciliter la conception ou pour réaliser l'évaluation dans la conception, de nouveaux outils sont nécessaires. Ces outils seront développés à la fin du cycle de recherche. Ils peuvent être construits à partir des éléments spécifiques à une certaine situation ou à plusieurs situations dans lesquelles se trouve le processus de conception analysé ou à partir des éléments généraux. Par la suite, ces outils peuvent être utilisés d'une manière générale ou spécifique.

4.3 La démarche de recherche utilisée dans ce travail

La première étape de notre démarche de recherche consiste en l'analyse qualitative des itérations présentée dans le chapitre précédent. Nous avons considéré que la performance du processus de conception est influencée par les itérations de conception. De là, nous avons commencé par l'étude de celles-ci afin de les caractériser. Cette étude a permis l'identification des sources d'itération, puis de les classer selon une typologie à plusieurs dimensions. Ce travail nous a permis d'acquérir un premier niveau de connaissance sur les itérations en conception. La deuxième étape de notre démarche de recherche porte sur l'analyse d'expériences de conception. Notre objectif est de valider et consolider les résultats de l'analyse qualitative ainsi que de mieux comprendre les mécanismes d'apparition des itérations en conception. L'expérimentation nous permet aussi d'avoir des données pour la quantification de l'impact des itérations sur le processus de conception.

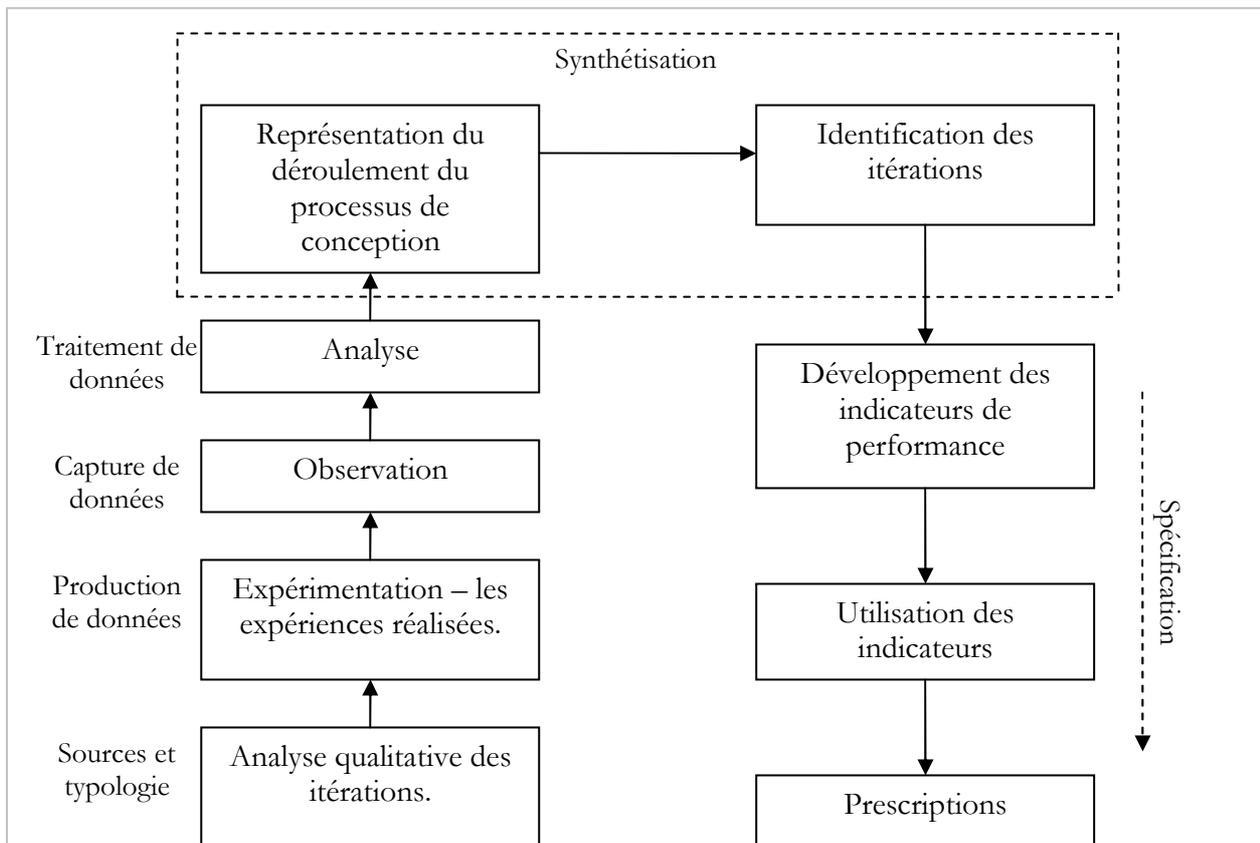


Figure 35- La démarche de conception utilisée dans ce travail

Une expérience de conception produit des informations brutes. Celles-ci contiennent, à leur tour, des informations utiles (dialogues, gestes, calculs, objets intermédiaires, différentes manières d'emploi des outils de calcul, de communication, etc.) et des informations inutiles qui doivent être ignorées dans l'analyse.

Afin d'aborder les différents types de problèmes de conception identifiés dans le chapitre 1 (§1.2.1), trois expériences de conception ont été utilisées. La première a un caractère innovant, la deuxième un caractère routinier et la troisième peut être considérée comme une expérience de conception créative.

Dans la phase d'analyse, l'information est encore filtrée et structurée. Les analyses ont comme but : l'identification de nouveaux types et sources d'itérations, l'élaboration d'une typologie des interactions entre les participants à la conception afin d'analyser leur impact sur les itérations, l'influence des objets intermédiaires sur les itérations, l'identification des itérations à partir des fonctions du produit, etc. Notons ici que l'analyse peut se faire différemment selon le niveau de décomposition du processus considéré. En effet, en fonction du type d'amélioration des performances du processus de conception souhaité (locale ou globale), on peut étudier le processus de conception au niveau des actes de conception, au niveau des tâches de conception ou au niveau des phases de conception. On peut également combiner des niveaux d'analyse différents. L'analyse conduit à l'identification des itérations observées dans le processus de conception et des données associées peuvent être utilisées pour des fins de quantification.

Avant de terminer notre cycle de recherche, nous introduisons une étape de définitions d'indicateurs de performance. Nous avons développé deux types d'indicateurs : (1) les indicateurs de processus (ou de suivi du processus), et (2) les indicateurs de résultat. Ces indicateurs peuvent être utilisés, sous forme d'un tableau de bord par exemple, pour l'évaluation des performances du processus de conception. La manière selon laquelle ces indicateurs seront utilisés dépend de l'objectif de l'utilisateur et du moment de l'évaluation (au cours de la conception ou à la fin de celle-ci).

La démarche de recherche utilisée dans cette thèse est bouclée par l'étape de prescriptions concernant les possibilités d'augmentation des performances du processus de conception prenant en considération les itérations. Dans *l'Annexe 2*, nous présentons un algorithme qui permet la réduction du nombre d'itérations causées par l'interdépendance des tâches. Dans ce cas, on peut réduire la durée totale du processus de conception.

4.4 Description des expériences de conception étudiées

Nous proposons dans cette partie, de décrire les expériences utilisées dans ce travail. Le travail d'analyse, quant à lui, sera présenté dans le chapitre 5.

4.4.1 Première expérience étudiée

Cette expérience de conception a été réalisée dans la plateforme PICCO du laboratoire M3M de l'UTBM. Nous avons voulu, par cette expérience, observer les itérations au cours du processus de conception et analyser l'influence des **Objets Intermédiaires** sur les itérations.

L'expérience se déroule en présentiel. Ce type de déroulement nous donnera la possibilité d'avoir plusieurs discussions simultanées, la possibilité de travailler sur des objets physiques et la possibilité d'avoir une grande richesse d'interactions.

L'expérience a comme objectif la re-conception d'un paquet de papier à cigarettes. Ce produit, comme ceux de la concurrence, a les caractéristiques suivantes : il permet de délivrer 100 feuilles de papier, divisées en deux distributeurs différents. L'objectif est de se démarquer de la concurrence en

reconcevant les emballages de papier avec la prise en compte du petit problème fonctionnel suivant : lorsque le papier contenu dans les distributeurs (qui ne sont pas séparés) vient à diminuer de deux tiers, les feuilles sont susceptibles de se mélanger et il devient difficile de les saisir sans les froisser ou sans déchirer le distributeur. Le second objectif est de donner un "look" plus jeune au produit en changeant éventuellement sa forme.

Les contraintes suivantes ont été imposées aux concepteurs :

- Concevoir pour un coût inférieur à 50 points (le point est une unité de valeur que l'on peut arbitrairement assimiler à des euros). Si possible, ce coût sera minimisé.
- Conserver la notion de deux distributeurs différents délivrant 2 paquets de 50 feuilles imbriquées.
- Mettre en évidence sur une des faces du paquet un logo avec les lettres T. L.
- Le temps alloué pour ce travail est de 1h 30mn.

L'évaluation des coûts est basée sur les éléments suivants :

- Les feuilles de papier dans lesquelles est taillé le produit sont de format A3, et coûtent 25pts.
- Le format A4 peut être utilisé pour un coût de 15 pts.
- Les opérations de fabrication sont le poinçonnage pour un coût de 5 pts, le pliage (2pts), l'impression (5pts par couche) et le collage (10pts).
- Les coûts sont susceptibles d'évoluer en fonction de l'évolution du marché dans une fourchette de +/- 10%.

Le matériel disponible pour l'expérience est constitué de 3 paires de ciseaux, de feuilles A4 et A3, de crayons, de colle et ruban adhésif.

Quatre acteurs ont participé à cette expérience. Il n'y avait pas de rôle précis attribué à chaque acteur.

Le produit de cette expérience est un produit connu, avec une complexité réduite. Pour le concevoir l'utilisation de certaines solutions techniques innovantes peut être nécessaire. En considérant ces aspects, nous considérons que cette expérience de conception fait partie de la classe des problèmes de **conception innovante**.

Cette expérience a duré **1 heure et 30 minutes**.

Pour analyser le processus de conception dans cette expérience, elle a été entièrement filmée. Son analyse nous permet d'observer le comportement des concepteurs, l'échange d'informations entre eux, la manière dont ils utilisent les différents outils, le moment d'apparition des objets intermédiaires, l'impact de chaque objet intermédiaire sur le développement des solutions proposées, etc. Tous les objets utilisés ou créés durant l'expérience ont été récupérés afin d'être analysés. Ainsi, avec le film et les objets récupérés, nous disposons d'une trace assez complète du processus de conception à étudier.



Figure 36- Environnement de l'expérience

4.4.2 Deuxième expérience étudiée

La deuxième expérience a été préparée et réalisée en Roumanie, à l'Université de Pitești, par un groupe de trois ingénieurs. Dans cette expérience, nous avons voulu étudier les influences des différents types d'actions entre les participants sur le déroulement du processus de conception et quantifier les différents types d'itérations.

Comme la première expérience, cette expérience se déroule aussi en présentiel. Le but de l'expérience est de concevoir un dispositif d'usinage pour le perçage d'une pièce en fonte grise (Figure 37). Comme la pièce a trois trous identiques, le dispositif doit être rotatif, avec un système d'indexage, pour permettre le perçage trou par trou.

Les données initiales du cahier de charges sont les suivantes :

- Le dessin de la pièce et son matériau, (Figure 37).

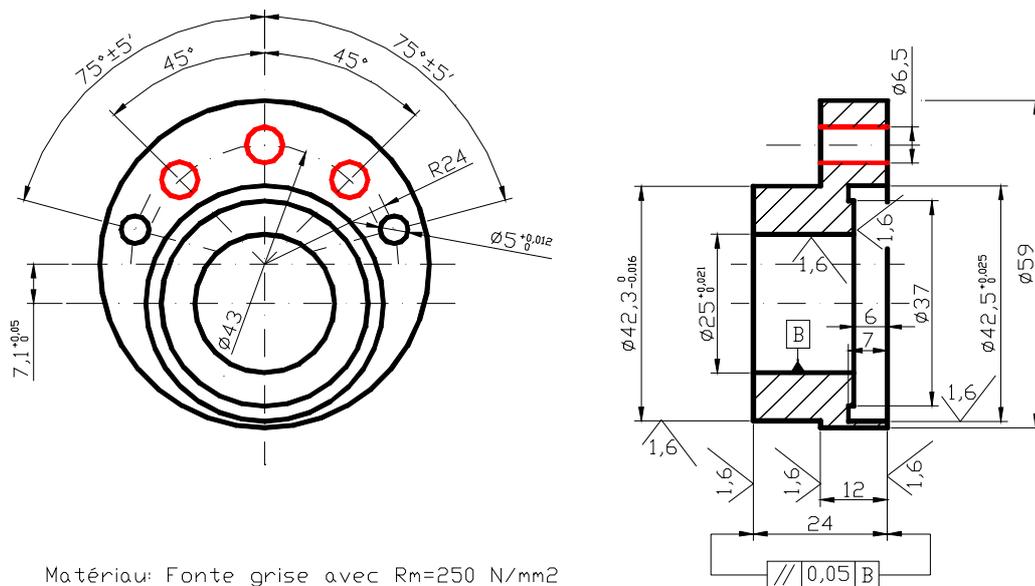


Figure 37- Le dessin de la pièce

- La machine utilisée.
- Le nombre de pièces usinées par an.
- La date limite pour finir le projet.
- Le coût doit être minimisé.

Les participants à la conception ont des rôles représentant les métiers suivants :

- CP chef de projet.
- SM spécialiste en matériaux.
- SD spécialiste en usinage des pièces et en dispositifs d'usinage.

Pour réaliser la conception, les participants ont utilisé :

- une base de données pour le choix des matériaux ;
- AutoCAD pour réaliser les dessins ;
- des moyens classiques pour faire les calculs et les représentations graphiques.

Le produit de cette expérience est un produit connu, avec une complexité élevée. Pour ce produit, on connaît la stratégie de conception, et les connaissances à mettre en œuvre sont identifiées. En considérant ces aspects, cette expérience de conception appartient à la classe des problèmes de **conception routinière**.

Cette expérience a duré près de **14 heures et 20 minutes**.

Cette expérience de conception a été entièrement enregistrée sur support audio afin d'obtenir une trace des échanges verbaux entre les participants de l'expérience. Nous avons aussi photographié l'espace de travail, l'écran du poste de travail, (Figure 41) ainsi que l'espace autour du poste de travail. Les documents produits, numériques ou non, ont été récupérés à la fin de l'expérience.

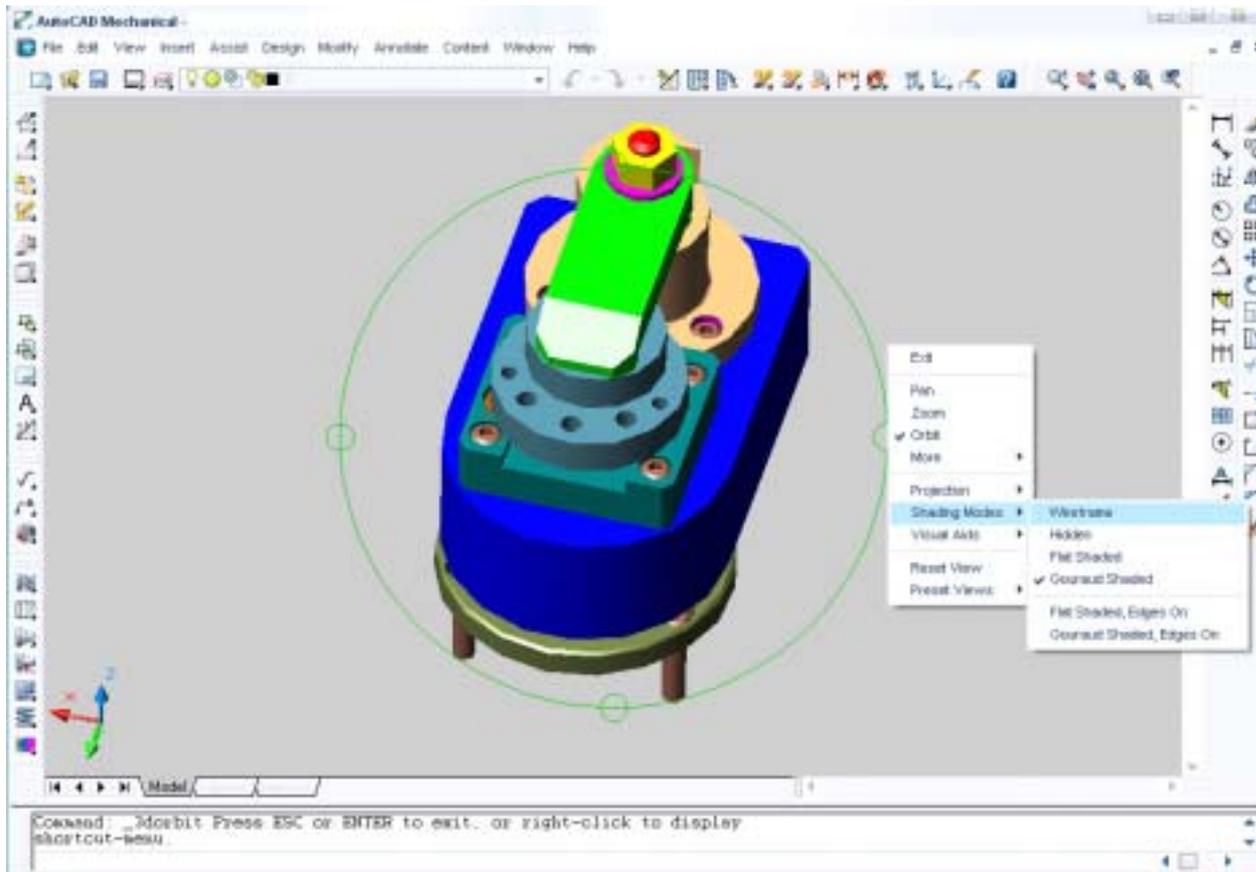


Figure 38- L'écran du poste de travail

4.4.3 Troisième expérience étudiée

La troisième expérience étudiée dans notre travail a été préparée et réalisée par le groupe GRACC (Groupe de Recherche sur l'Activité de Conception Coopérative), qui est constitué de 4 laboratoires de recherches appartenant aux universités de Belfort, de Grenoble, de Nancy, et de Nantes. Le but de cette expérience est la re-conception d'une remorque de VTT pour enfant. Il s'agit d'une expérience de conception à distance car les concepteurs travaillent dans leur établissement respectif.

Dans ce cas, les concepteurs connaissent, dès le départ, une partie du cahier des charges du produit. Par contre, ils ne savent pas, a priori, comment décomposer le problème pour obtenir une solution. Ainsi, la détermination du plan d'activités fait aussi partie de la conception. De plus, les connaissances technologiques et scientifiques nécessaires ne sont pas clairement identifiées ou maîtrisées. Cette expérience a un caractère double. D'une part, elle fait partie de la classe des problèmes de **conception innovante** parce que, en principe, le produit est connu auparavant, et d'autre part, elle appartient à la classe de **conception créative** parce qu'il y a encore beaucoup d'éléments inconnus dans le problème traité : certaines fonctions du produit, des solutions structurelles, certains paramètres du produit, etc.



Figure 39- Exemple d'une remorque de VTT

Quatre concepteurs, chacun de chaque université, ont participé au processus de conception. Chacun d'entre eux ayant un rôle défini :

- CP- Un chef de projet.
- CL- Un concepteur Liaisons.
- CC- Un concepteur Châssis.
- DE- Un designer Ergonome.

Les concepteurs ont travaillé de manière synchrone pendant quatre sessions. Chaque concepteur a travaillé également individuellement et pouvait contacter n'importe quel autre concepteur, mais seulement par courrier électronique. Cette condition permet d'avoir, à la fin de l'expérience, l'enregistrement de tous les échanges d'informations entre eux. Les outils employés pendant les sessions synchrones de conception sont : Netmeeting et le téléphone pour la communication orale, ftp (File Transfer Protocol) pour l'échange de dossiers, et Solidworks pour la CAO (Figure 40).

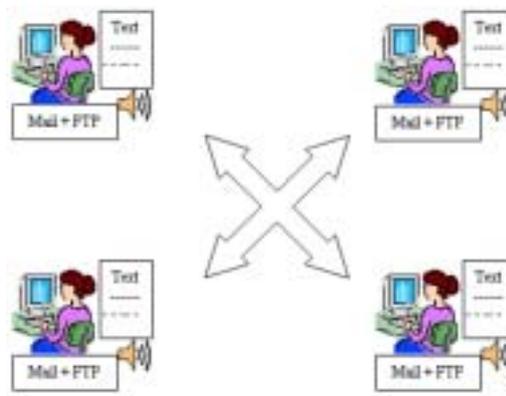


Figure 40- L'expérience de conception à distance

Pour permettre le partage, en temps réel, des notes, des diagrammes et des croquis, un tableau blanc partagé a été utilisé.

Les quatre séances synchrones de cette expérience ont été entièrement filmées. Sur chaque poste de travail, deux caméras ont été utilisées pour enregistrer le maximum de données sur le déroulement de la conception. Tous les fichiers produits, en synchrone ou en asynchrone, ont été récupérés.

Notre objectif étant l'étude des itérations en conception, nous avons focalisé notre analyse sur la troisième séance synchrone. Cette séance était la plus riche en interactions entre les concepteurs. La séance a duré près d'**1 heure**.

Notons que cette expérience a été utilisée par différents chercheurs, aussi bien dans notre laboratoire que dans les trois autres, pour différentes analyses.



Figure 41- Les écrans des quatre postes de travail

4.5 L'observation et le recueil de données des expériences de conception

4.5.1 Le rôle de l'observation

Les observations permettent d'entrer dans l'environnement de la conception, en temps réel ou non, pour collecter des données, sans apporter de changements au déroulement du processus de conception.

L'observation des concepteurs en situation de travail permet d'obtenir des données d'une grande richesse sur :

- le déroulement du processus de conception étudié ;
- le comportement des concepteurs impliqués ;
- les interventions spontanées des concepteurs pendant les différentes activités du processus de conception ;
- les interactions entre les participants ;
- la manière d'utilisation des différents outils de conception et de communication.

4.5.2 Les limites de l'observation

Dans son travail, *Orne* [ORNE 69] affirme que les sujets (participants) ne peuvent jamais être neutres pendant une expérience. Il indique que l'effet d'être observé change le comportement des participants. Les participants peuvent essayer d'être « de bons sujets » par la tentative de produire

des données qu'ils pensent que nous attendons de leur part. La présence d'un observateur (dans notre cas, le chercheur) peut également influencer le comportement des concepteurs [ROSE 63]. De même, la présence de l'observateur peut influencer les résultats d'une expérience si celui-ci communique, volontairement ou involontairement, ses réflexions aux participants [FRAN 96]. Ces réflexions peuvent être sous forme verbale ou gestuelle.

Pour les expériences utilisées dans ce travail, nous avons considéré ce problème et nous nous sommes assuré que l'observation n'avait pas d'influence sur les participants ou que celle-ci était minimale. Dans toutes les situations, les participants ne savaient pas que notre analyse allait porter sur les itérations de conception.

4.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps, la démarche globale de recherche que nous avons adoptée dans ce travail. Cette démarche est inspirée du modèle de *Blessing (Design Research Methodology)* et du cycle de recherche de l'équipe CID de notre laboratoire. Nous avons ensuite introduit les expériences de conception utilisées dans nos travaux. Trois expériences ont été réalisées. Elles reflètent les différents types de problèmes de conception qu'on peut rencontrer en pratique. Les expériences sont décrites en termes d'objectif, de matériel utilisé, de participants, de durée et de conditions de déroulement et d'enregistrement. Nous avons aussi donné un aperçu sur le rôle de l'observation en expérimentation et ses limites. Nous proposons, dans le chapitre suivant, d'analyser les expériences présentées.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES EXPERIENCES DE CONCEPTION

5 ANALYSE DES EXPERIENCES DE CONCEPTION

5.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une analyse des expériences de conception utilisées dans ce travail de thèse. Deux types d'analyses y sont présentés : l'étude des itérations en conception, et l'identification des itérations dans les expériences analysées.

Les itérations peuvent être étudiées différemment en fonction du niveau de décomposition considéré du processus de conception. Trois niveaux de décomposition ont été considérés : micro, méso et macro. Pour chaque niveau de détail, les méthodes d'analyse à employer seront différentes (analyse des corpus, analyse des actes de conception, modèle FBS, Objets Intermédiaires, analyse des interactions entre les participants, modélisation du déroulement, etc.).

La deuxième partie de ce chapitre porte sur l'identification des itérations dans les expériences analysées. En fonction des objectifs d'amélioration souhaités, l'identification peut être réalisée au niveau micro (actes de conception par exemple), au niveau méso (analyse de déroulement) ou au niveau macro (activités et phases de conception).

5.2 Itérations et niveaux de décomposition du processus de conception

Pendant son déroulement, le processus de conception passe par toutes les étapes de la conception, de la clarification du problème, où le produit est dans le domaine fonctionnel vers la conception détaillée où le produit est plutôt dans le domaine structurel (Figure 42). Ce passage n'est pas linéaire, et en plus il n'est pas dans un seul sens. Des itérations, représentant des retours arrière, sont observées. Les retours aux étapes inférieures du processus sont nécessaires à un moment donné pour : construire de nouvelles connaissances, pour corriger des erreurs de conception, pour améliorer une solution partielle, pour résoudre des conflits entre les différents métiers, pour refaire des calculs à cause de différents changements technico-économiques, etc.

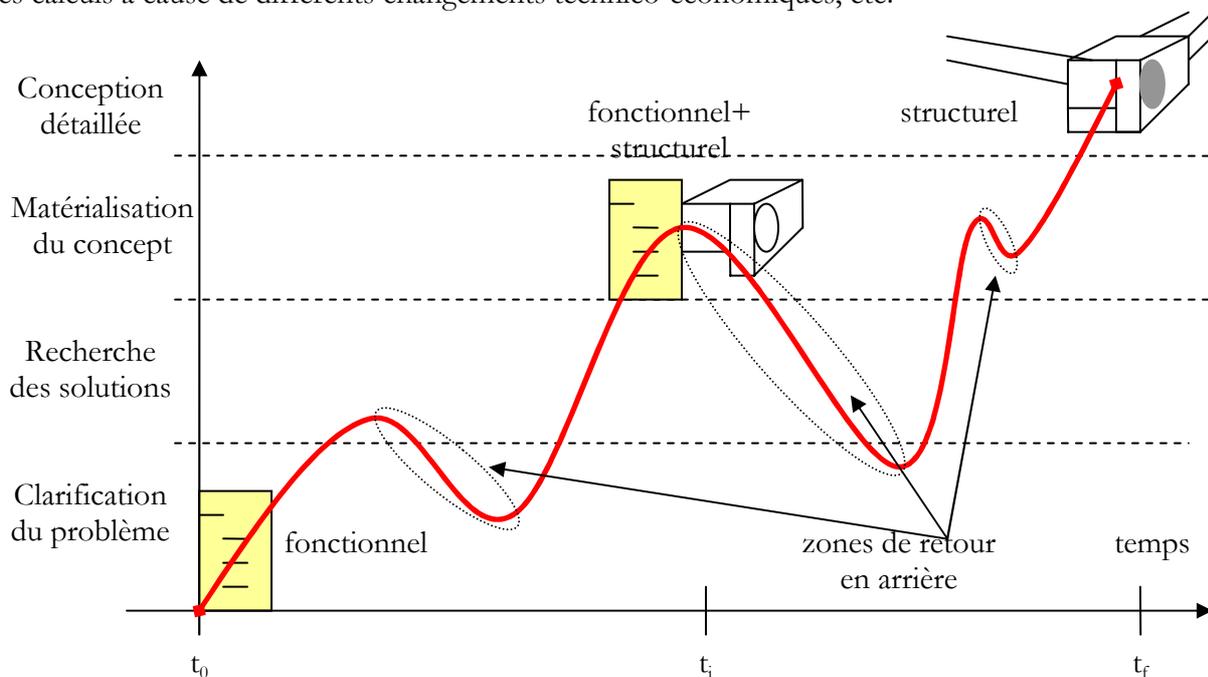


Figure 42- Evolution du produit, du « fonctionnel » vers le « structurel »

Ce type de représentation, qui montre les passages ascendants et descendants entre les étapes de conception, sera utilisé pour mettre en évidence les itérations produites à un niveau global. Pour mettre en évidence les itérations au niveau local, nous focalisons notre représentation au niveau des étapes de conception. En fonction du degré de granularité de notre analyse et de la complexité du produit, nous pouvons étudier les itérations au niveau des phases, des activités ou des tâches ou encore au niveau des actes de conception, voir la Figure 43.

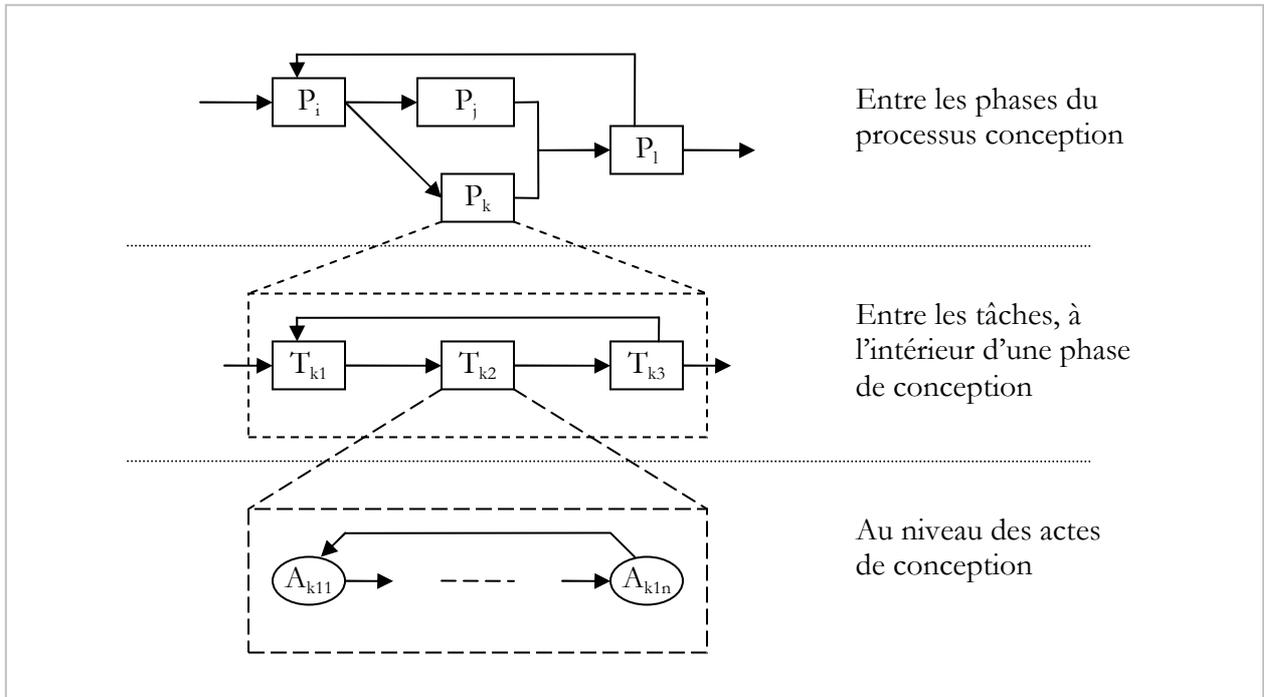


Figure 43- Itérations et degré de décomposition du processus de conception

5.3 Méthodes d'analyse des expériences de conception

5.3.1 Analyse des actes de conception

Un acte de conception représente une description de l'activité de conception basée sur la caractérisation des échanges verbaux (actes de langage), des échanges gestuels et des échanges et interventions sur des objets intermédiaires entre les acteurs, lors de la coopération.

Selon GRACC [GRAC 02] un acte de conception est défini *comme l'interaction d'un concepteur dans un groupe de conception*. Ce groupe est caractérisé par des outils, des compétences et des métiers particuliers. L'acte constitue aussi un aller-retour entre le groupe de conception et un fond commun, voir Figure 44. *L'ensemble des actes va faire avancer la conception et de la même manière il va servir à enrichir le fond commun (évolution des connaissances et des incertitudes) ainsi que les compétences des concepteurs* [GRAC 02].

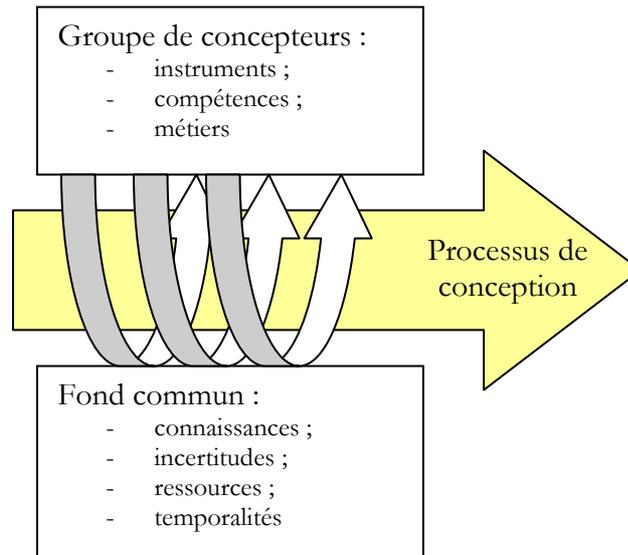


Figure 44- Les actes de conception, selon GRACC [GRAC 02]

Lors d’une activité coopérative en conception, les acteurs interagissent ensemble. Chacune des interactions est constituée d’un ou de plusieurs actes de conception. Ces actes de conception sont regroupés dans le Tableau 4 proposé par Garro [GARR 00].

Action	Objet	Type	Sujet
Demander	Information	Générale	Projet (global, ressource, temps...)
		Description	
	Explication		
	Contexte		
Solution	Evaluation	Contrainte	Produit (global, composant, fonction, entité)
		Fabrication	
		Fonctionnelle	
Organisation	Accord	Structurelle	Objet Intermédiaire
		Opératoire	
Produire (proposition, affirmation, négation)	Objet Intermédiaire	Critère +	Produit (global, composant, fonction, entité)
		Critère -	
	Affectation d’un rôle		
	Coordination des rôles		
	Micro-action		
Décision	Objet Intermédiaire	Positif	Produit (global, composant, fonction, entité)
		Négatif	
		Texte	
Objet Intermédiaire	Objet Intermédiaire	Graphe	Produit (global, composant, fonction, entité)
		Dessin	
		Prototype	
Décision	Objet Intermédiaire	Positive	Produit (global, composant, fonction, entité)
		Négative	

Tableau 4- Le codage des actes de conception proposés par Garro [GARR 00]

Chaque acteur de la conception va faire une action qui a un objet (défini par un type) et qui porte sur un sujet. Par exemple, « un acteur i fait une **proposition d’évaluation** (critère +) sur un **composant** ».

Selon Garro [GARR 00], tous les actes peuvent donc se coder de la manière suivante :

$$\text{Acte de conception d'acteur } i = \text{ACTION (D, P)} + \text{OBJET (1, \dots, 22)} + \text{SUJET (P}_j, \text{Pd)}.$$

L'analyse et l'interprétation des actes de conception peuvent être utilisées pour identifier les itérations de conception à niveau micro du processus de conception. Cependant, il faut souligner que ce type d'analyse est très lourd à mettre en place. Pour l'exploiter efficacement, il faut l'utiliser sur une partie limitée du processus de conception. Une généralisation des résultats obtenus sera ainsi nécessaire et doit être faite sur des bases bien identifiées.

Les actes de conception peuvent être étudiés avec plus de détails en distinguant les actes de langage [AUST 70] [SEAR 72] et les actes de dialogue [VERN 92].

5.3.1.1 Les actes de langage

Un acte de langage est un moyen mis en œuvre par un locuteur pour agir sur son environnement. Par ses mots, il cherche à informer, inciter, demander, convaincre, etc., son ou ses interlocuteurs par ce moyen. L'acte de langage désigne donc aussi l'objectif du locuteur au moment où il formule ses propos [AUST 70] [SEAR 72].

Lors d'un acte de langage, il existe toujours un émetteur E et un ou plusieurs récepteurs R. En général, pour transmettre sa pensée au récepteur, l'émetteur doit la coder (il doit transformer sa pensée en mots, puis, éventuellement, utiliser d'autres moyens de communication). A son tour, le récepteur doit décoder le message pour arriver à comprendre son sens (Figure 45).

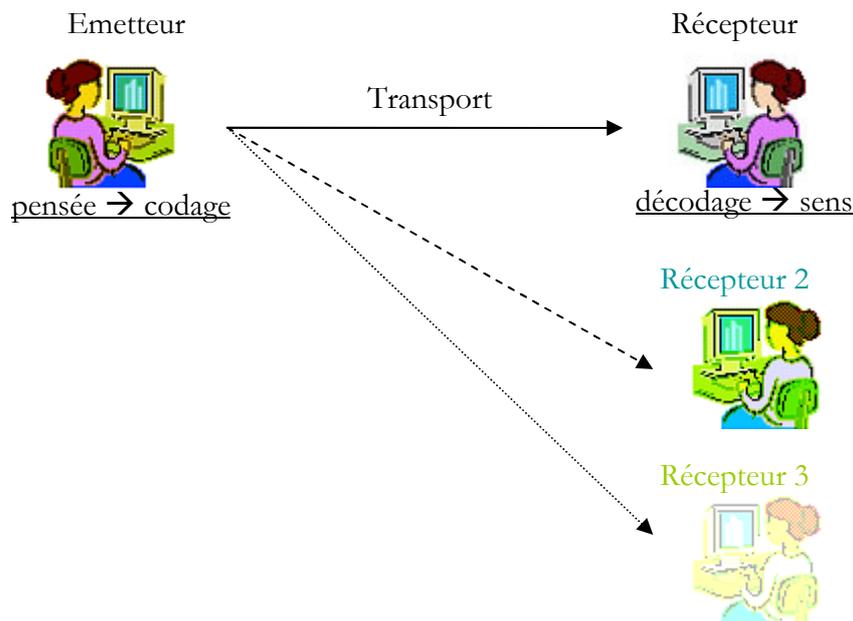


Figure 45- Réalisation d'un acte de langage entre l'émetteur et le récepteur

La pertinence d'un acte de langage énoncé par un émetteur E, est relative au but poursuivi par E. Elle est, aussi, relative au but que R poursuit de son côté. Deux cas peuvent alors se présenter, la *coopérativité* et la *concurrence* [SPER 89] :

- Dans la coopérativité, le but est partagé : $b_E = b_R = b$. La pertinence d'un acte α_{ER} de E à l'adresse de R, doit amener E et R dans une situation de coopération (ou les maintenir dans cette situation s'ils y étaient déjà) et contribuer à les rapprocher du but b.

- Dans la concurrence, le but n'est pas partagé : $b_E \neq b_R$:
 - Soit E et R engagent une négociation qui peut réussir (une coopération pour atteindre un but de compromis ou même les deux buts b_E et b_R) ou échouer ;
 - Soit E et R restent sur leurs positions sans chercher à les négocier (concurrence). Dans ce cas, la stratégie de E vis-à-vis de R est :
 - d'arriver au but de E ;
 - d'empêcher que R n'arrive à son but.

5.3.1.2 Les actes de dialogue

A partir des actes de langage, on peut définir l'acte de dialogue comme « *une suite coordonnée d'actions (langagières et non-langagières) devant conduire à un but* » [VERN 92]. Le but du dialogue est alors de réduire l'écart cognitif initial entre les participants et d'instaurer une convergence. Le dialogue avance dans le temps et tend à réduire les écarts entre les interlocuteurs (acteurs). Ceux-ci agissent sous forme de requêtes, répliques, réponses, mises en question ou même remises en cause. Au cours de cette interaction, ils modifient leurs connaissances, acquièrent de nouvelles connaissances, tant sur le problème en cause, sur leur interlocuteur ou sur leurs métiers.

Sur la Figure 46, nous montrons deux situations différentes : a) le but est satisfait les actions des participants ont une suite convergence, b) le but n'est pas satisfait à cause des divergences entre les participants.

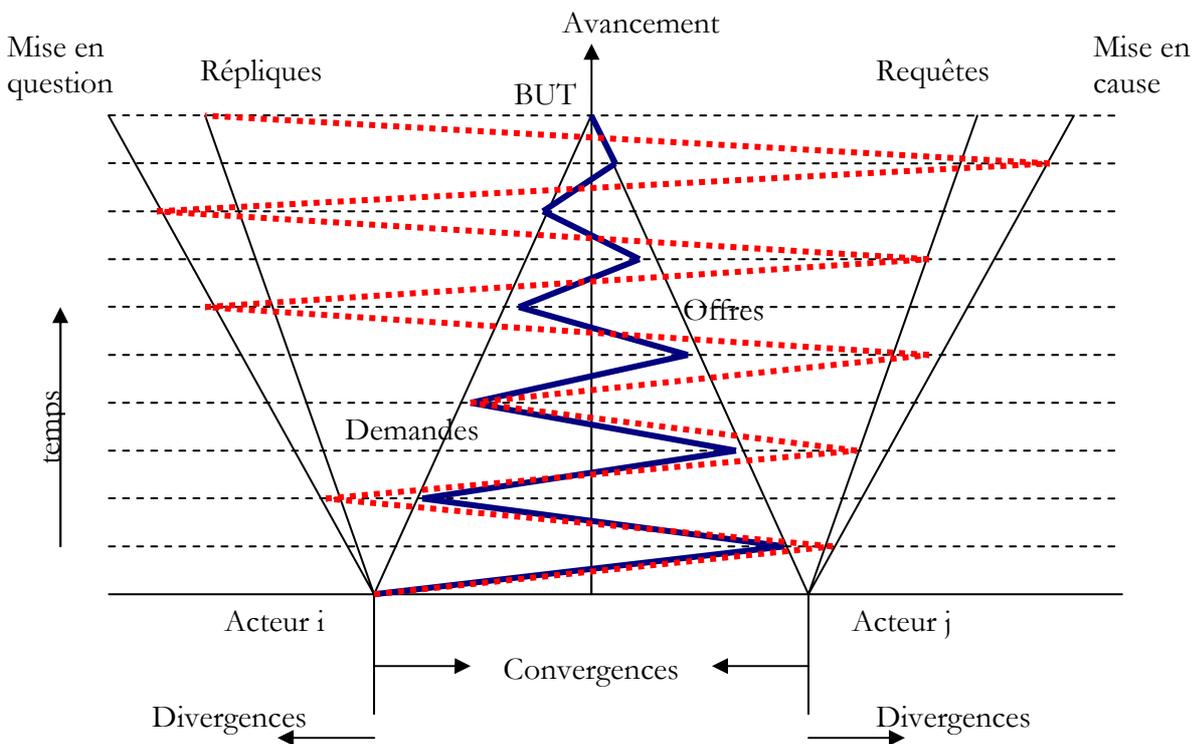


Figure 46- Les actions des acteurs dans un acte de dialogue

La satisfaction d'un but n'est pas toujours évidente. On peut avoir plusieurs possibilités en essayant d'atteindre le but de E et aussi de R dans un acte de dialogue, voir Figure 47.

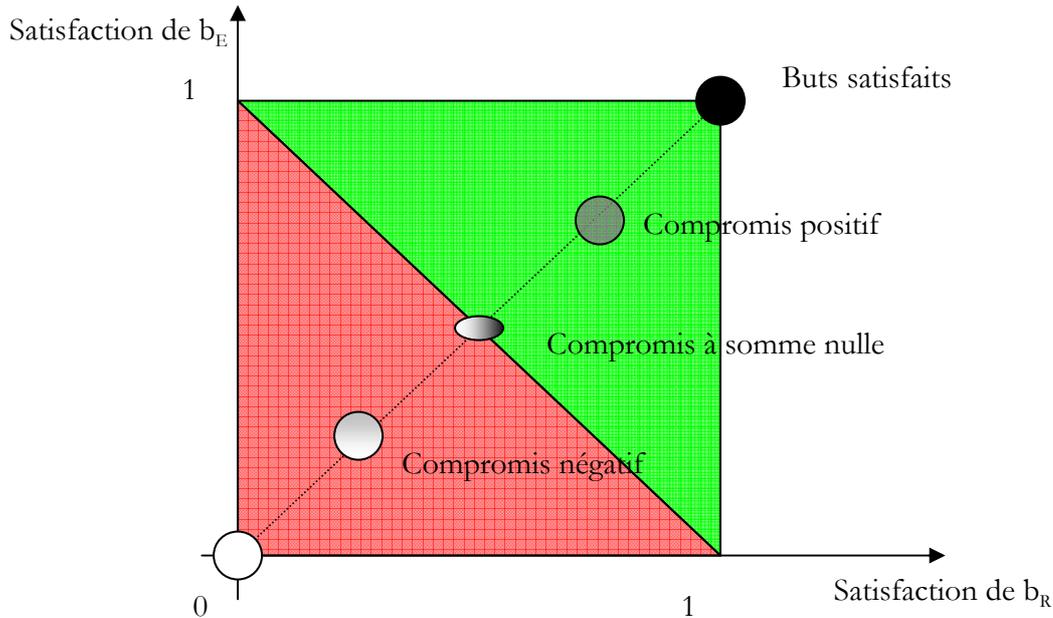


Figure 47- La satisfaction du but

5.3.1.3 Itérations liées aux actes de conception

L'analyse du processus de conception, à un niveau micro, en utilisant les actes de conception, fait apparaître trois nouvelles sources d'itérations.

5.3.1.3.1 Les buts différents

Dans un processus de conception, souvent les concepteurs poursuivent des buts différents. Ils doivent engager des négociations pour les atteindre. Un processus itératif sera nécessaire avant d'arriver à une solution satisfaisante.

5.3.1.3.2 La divergence des dialogues dans une négociation

Dans le cas d'une équipe pluridisciplinaire de conception, les points de vue des concepteurs peuvent être très différents. Ceci peut conduire à la divergence des dialogues lors de la recherche d'un compromis. Cette divergence peut conduire à de longues itérations de conception.

5.3.1.3.3 Le niveau de satisfaction d'un compromis

Le nombre d'itérations et leur ampleur est influencé par le niveau de satisfaction fixé par chaque acteur lors de la recherche d'un compromis. Ce niveau de satisfaction est lié à la qualité de la solution de conception développée.

5.3.2 L'analyse par le modèle FBS

Ce type d'analyse s'applique aussi à un niveau micro du processus de conception. Le modèle FBS est basé sur une description du processus de conception en termes de fonctions, comportements et structures que le produit conçu doit satisfaire. Les actions du concepteur ont pour objet la réalisation de l'une de ces entités. Nous avons introduit dans ce modèle les formes d'itérations qu'il est possible de rencontrer dans un tel modèle (Figure 48). Le modèle FBS permet de mettre en évidence trois nouveaux types d'itérations : fonctionnelles, structurelles et comportementales.

L'application du modèle enrichi permet d'indiquer les itérations sur lesquelles il faut porter le plus d'attention. Cette technique d'analyse est aussi lourde à mettre en place. Ceci est dû à la quantité

d'informations qu'il faut traiter pour obtenir le modèle relatif à un processus de conception donné puis l'analyser.

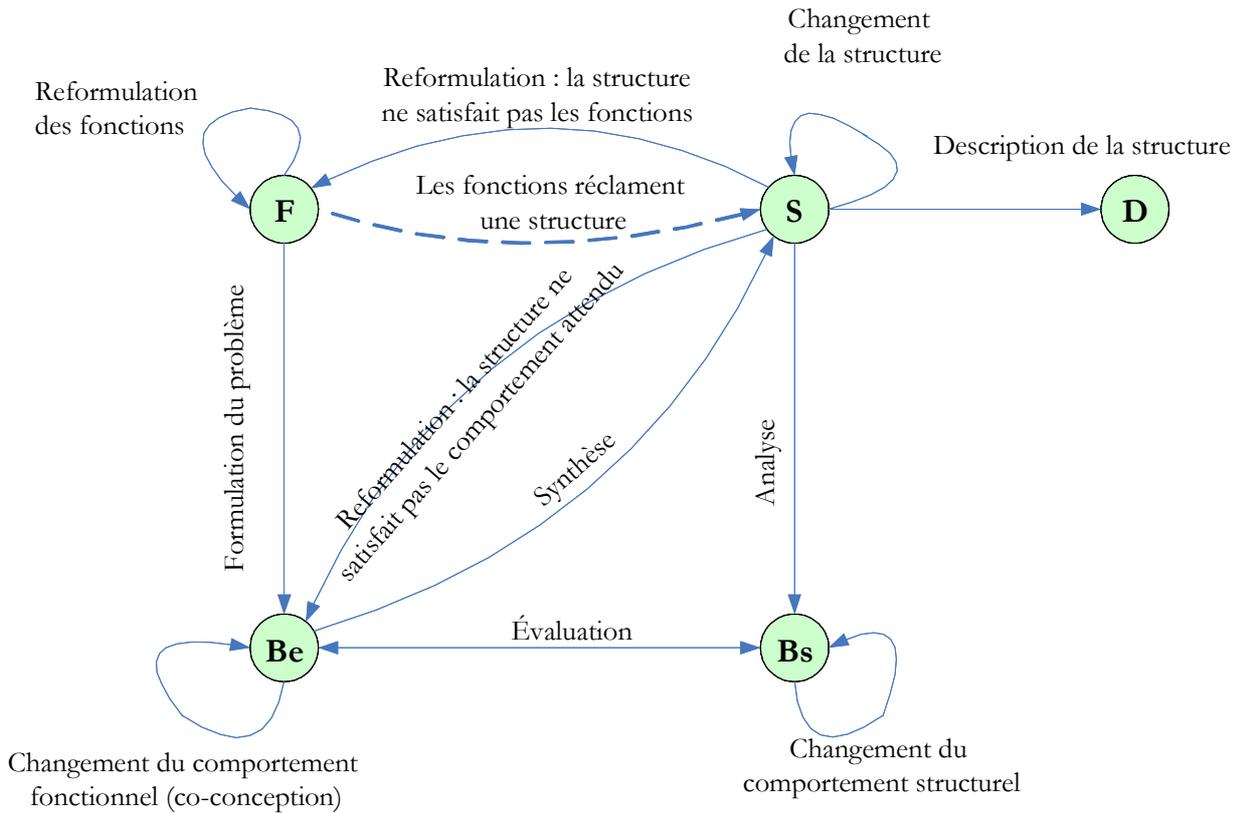


Figure 48- Le modèle FBS enrichi

- 1 – Formulation du problème (FP);
- 2 – Synthèse (SYN);
- 3 – Analyse (ANA);
- 4 – Evaluation (EVA);
- 5 – Description de la structure (DS);
- 6 – Changement de la structure (CS);
- 7 – Reformulation : la structure ne satisfait pas le comportement attendu (RSCF);
- 8 – Reformulation : la structure ne satisfait pas les fonctions (RSF);
- 9 – Réformation des fonctions (RF);
- 10 – Changement du comportement fonctionnel (CCF);
- 11 – Changement du comportement structurel (CCS);
- 12 – Proposition (P);
- 13 – Changement du besoin (C);
- 14 – Fonctions (F);
- 15 – Comportement attendu (Be);
- 16 – Comportement dérivé de la structure (Bs);
- 17 – Structure (S).

Figure 49- Le codage FBS enrichi des actes de conception

La Figure 50.présente les actes de conception relatifs au modèle FBS appliquée à la première expérience (re-conception du paquet de papier à cigarettes).

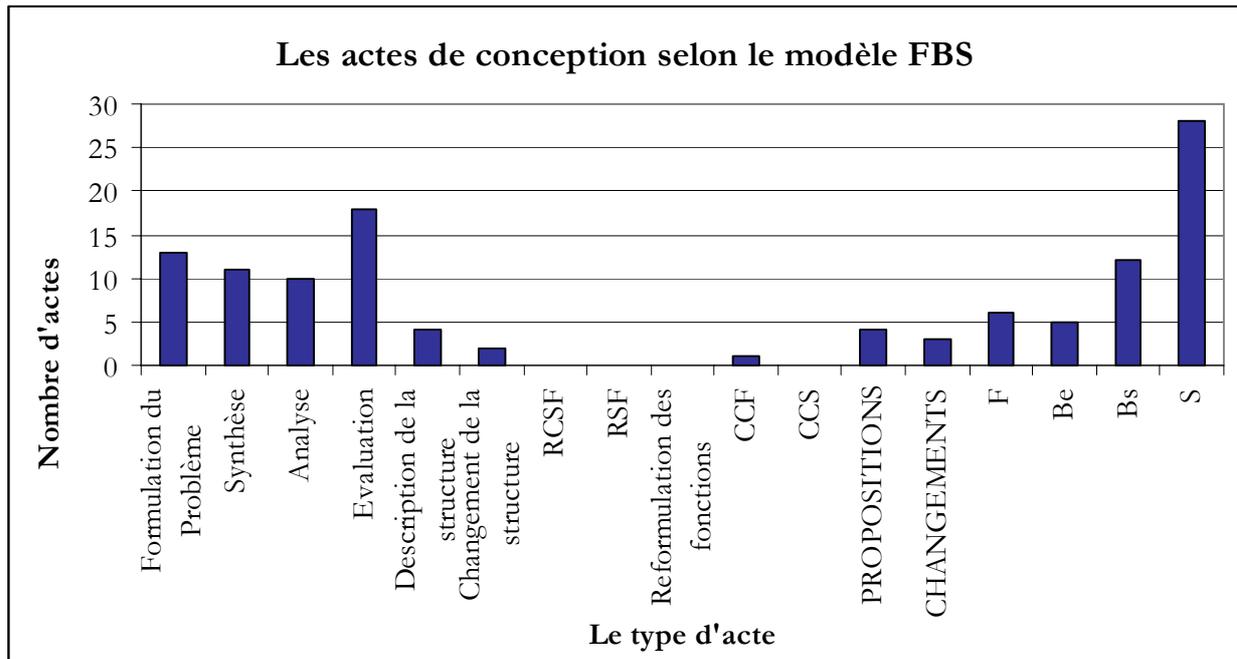


Figure 50- Les actes de conception selon le modèle FBS

Les actes de conception ont été réalisés, en général, pour proposer et développer des solutions pour la structure du produit et aussi pour évaluer cette structure.

Un nombre d'actes de conception a été réalisé pour faire différentes propositions ou changements nécessaires à cause des influences externes : fluctuation au niveau des prix de la matière ou au niveau technologique. Dans ce cas, les changements sont réalisés par des itérations involontaires.

Nous avons remarqué aussi la présence d'un petit nombre d'itérations à cause des changements du comportement fonctionnel et structurel, pour améliorer les performances du produit. Nous pouvons aussi remarquer que les solutions proposées pour la structure ont été satisfaisantes pour les fonctions du produit.

5.3.3 L'analyse des objets intermédiaires

D'après *Jeantet* et al. [JEAN 98], les objets intermédiaires sont des objets produits ou utilisés au cours du processus de conception, traces et supports de l'action à concevoir, en relation avec les outils, les procédures et les acteurs. Le concept d'OI constitue un moyen efficace de lecture de l'activité de conception réelle. Dans notre étude, nous nous intéresserons à l'analyse des expériences de conception à travers des OIs. Les OIs, créés et modifiés dans un processus de conception, constituant une ponctuation dans le temps et dans l'espace de travail; ils permettent de repérer les phases d'évolution du processus et aident à l'orientation des équipes sur les stratégies mises en pratique. D'une part, les OIs introduisent des contraintes et des stratégies dans le processus, d'autre part, ils mettent en rapport les représentations, les idées et les enjeux négociés autour de l'objet en conception et permettent le dialogue et la convergence entre une pluralité de domaines [PENA 05].

En général, différents types d'OIs sont utilisés au cours d'un processus de conception. *Garro* et al. ont analysé un processus de conception qui a duré six heures [GARR 95]. Cinq types différents d'OIs y ont été identifiés.

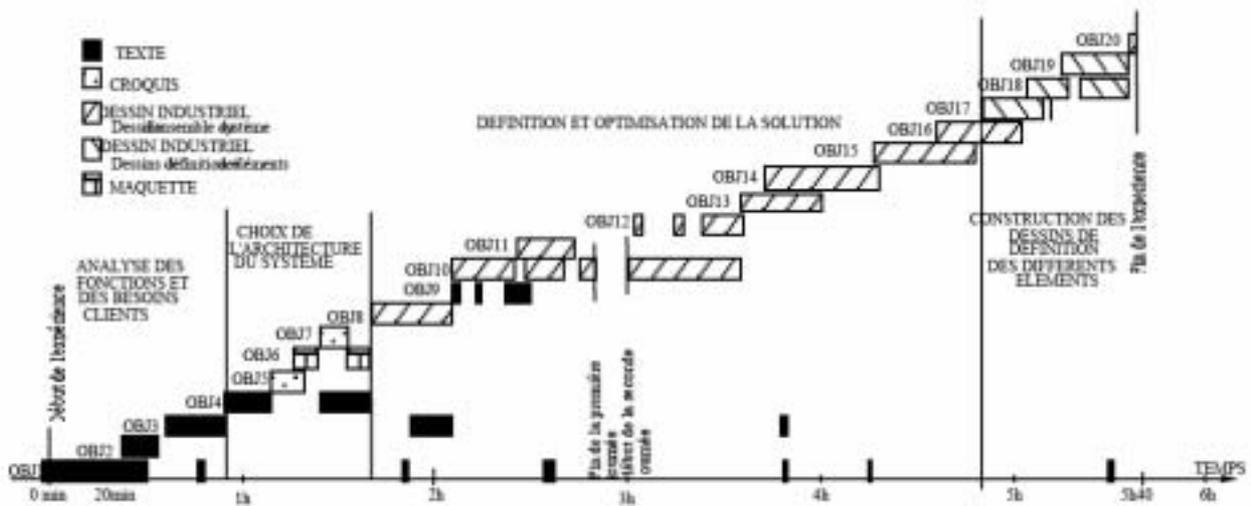


Figure 51- Types d'Objets Intermédiaires en conception [GARR 95].

Blanco [BLAN 98] classe les OI en deux catégories :

- **Dessins industriels :**
 - brouillons, croquis, esquisses ;
 - plans, modèles géométriques et schémas produits, épures, prototypes ;
- **Bases de données :** plannings, comptes-rendus de réunions, modèles de calcul, comptes-rendus d'essais, etc.

5.3.3.1 L'émergence des objets intermédiaires et la dynamique des connaissances

Pendant le déroulement du processus de conception, les acteurs conçoivent et utilisent des objets intermédiaires afin d'avoir un cadre commun pour exprimer leurs pensées et d'enrichir leurs connaissances vis-à-vis d'un problème de conception.

Lors de l'apparition d'un objet intermédiaire, il y a une certaine incertitude et un certain niveau de connaissances concernant la manière de résolution du problème. Dès que l'OI commence à être développé et exploité, de nouvelles connaissances seront accumulées. A un moment donné, si les connaissances accumulées peuvent satisfaire les exigences, les concepteurs peuvent passer à la résolution d'un autre problème. Sinon, ils feront appel à d'autres OI, existants ou à créer, et qui serviront comme base supplémentaire dans l'acquisition des connaissances et dans le développement des idées et des solutions. Ce dernier cas, se traduit par la répétition des activités de conception (Figure 52).

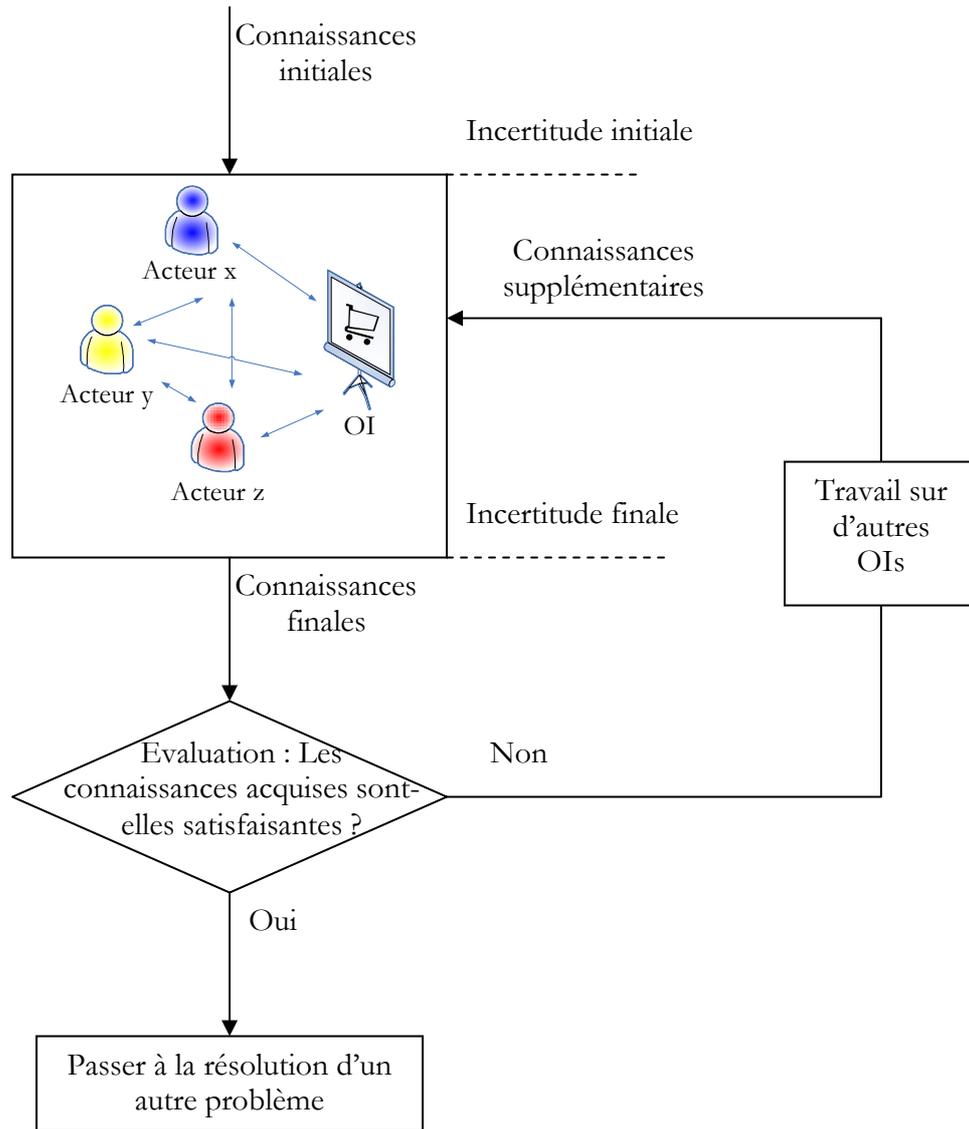


Figure 52- Construction des connaissances utilisant des OIs

5.3.3.2 Type de dépendances entre les objets intermédiaires

Chaque OI est une unité porteuse d'information (surtout de connaissances) qui est créée à partir des connaissances construites sur des OIs existants ou d'autres sources et qui peuvent être utilisées pour les OIs ultérieurs. Dans le cycle d'apparition des OIs, on peut distinguer les Objets Intermédiaires **en série, en chevauchement, en parallèle et interdépendants** (Figure 53).

- Pour la création des OIs en série les concepteurs ont besoin de connaissances construites sur des OIs précédents. Pour un OI totalement en série, son apparition est conditionnée par la réalisation en totalité de l'OI précédent. Par contre, l'OI en chevauchement peut apparaître avant que l'OI précédent soit complètement réalisé.
- Les OIs en parallèle sont développés en même temps. Entre eux, il n'existe pas de dépendance mutuelle de connaissances.
- Les OIs interdépendants sont caractérisés par un fort lien informationnel entre eux. Pour le développement de l'un d'entre eux, les concepteurs utilisent les connaissances construites sur l'autre. Ce type d'OIs peut nécessiter des répétitions dans le processus de conception. Les OIs interdépendants sont spécifiques au travail coopératif.

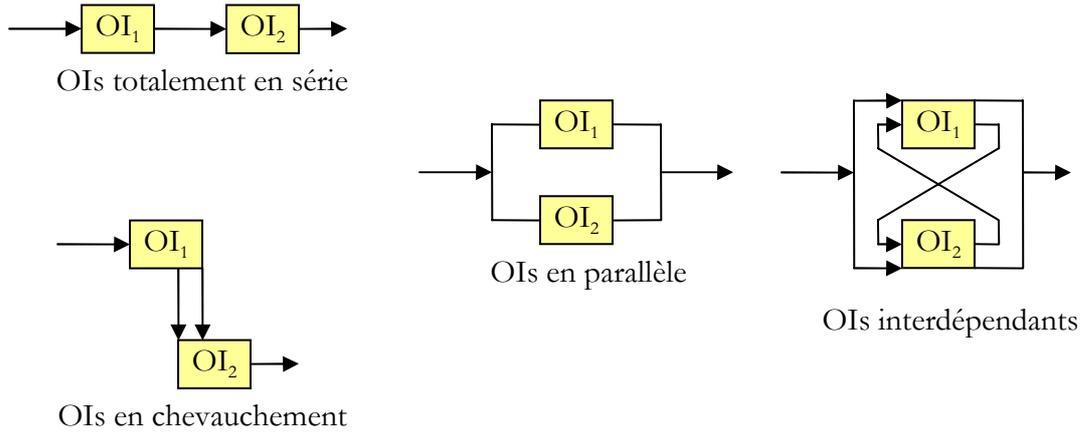
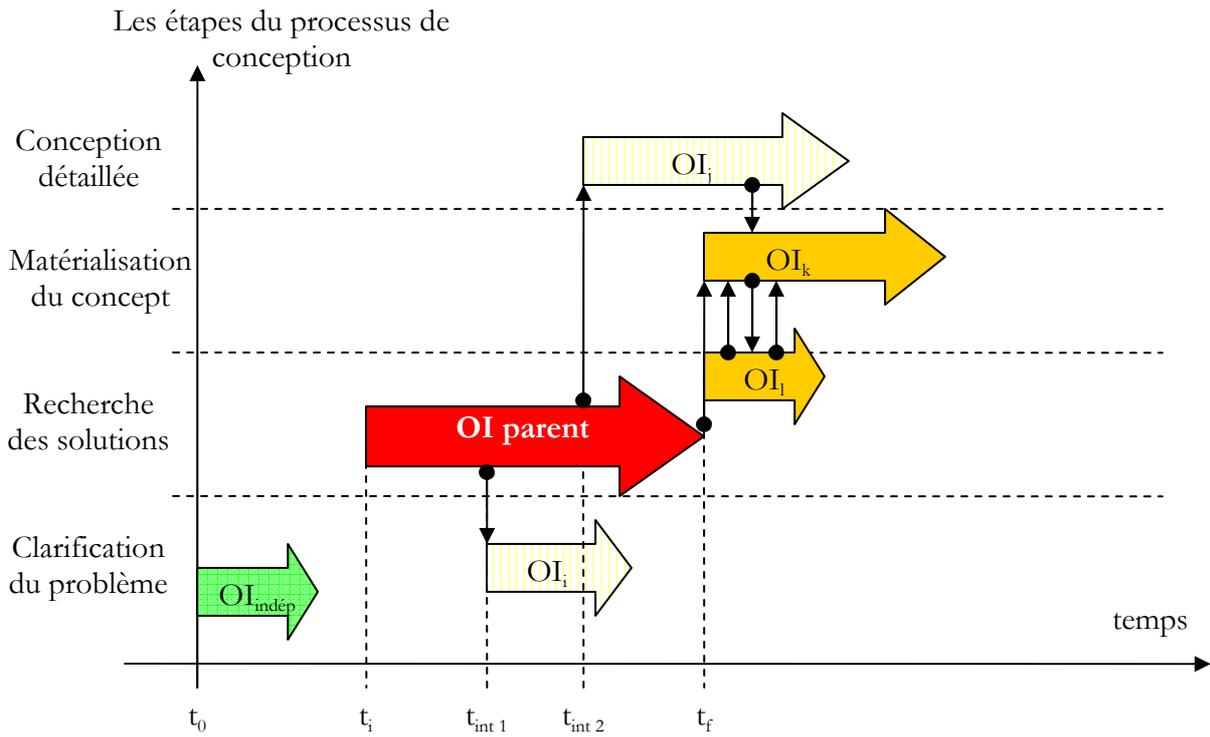


Figure 53- Les différents types de dépendances entre les objets intermédiaires

A ces types d'OIs, nous ajoutons une autre catégorie que nous appellerons les **OIs parents**. Ils sont utilisés pour exprimer une idée directrice et servent de support de référence informationnelle dans le développement d'autres OIs.



- Légende : ● → Flux de connaissances
 t_i – temps initial pour l'OI parent ;
 t_{int1} – temps initial pour l'OI_i ;
 t_{int2} – temps initial pour l'OI_j ;
 t_f – temps final pour l'OI parent et aussi temps initial pour OI_k et OI_l
 OI_{indép} – OI indépendant ; OI_i, ..., OI_l – OIs dépendants

Figure 54- Les OIs parent, les OIs dépendants et les OIs indépendants

5.3.3.3 Représentation matricielle des dépendances entre les objets intermédiaires

Connaissant les dépendances entre les OIs dans un processus de conception, il est possible d'analyser ceux-ci au moyen de la méthode DSM. Sur la Figure 55, nous indiquons la représentation matricielle de chaque type de liens entre les OIs.

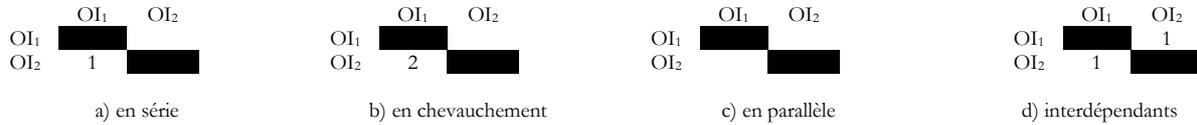


Figure 55- La représentation matricielle des dépendances entre les OIs

La représentation matricielle, peut ainsi nous donner, non seulement une vue d'ensemble sur les relations entre les OIs, mais aussi une bonne vue sur les flux d'informations entre les activités sous-jacentes (Figure 56).

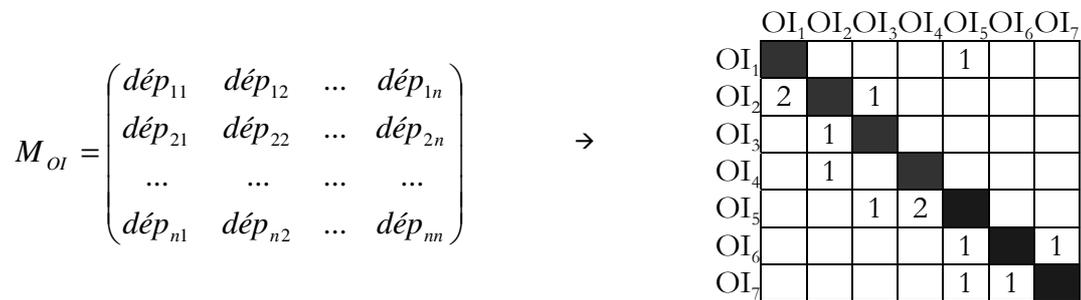


Figure 56- La représentation DSM de la matrice M_{OI}

La matrice DSM des OIs peut être réorganisée en utilisant l'algorithme de diagonalisation présentée dans le troisième chapitre. Dans ce cas, la diagonalisation de la matrice DSM permet :

- l'identification des cycles séparables des OIs et l'identification d'OI parent. Cette identification peut se faire pendant le déroulement du processus de conception afin d'offrir une vue sur la dynamique des connaissances, sur le nombre des OIs parent à un moment donné, sur le type des OIs descendants parmi un certain OI parent. En conséquence, si à un moment donné, le chef de projet doit intervenir pour « relancer » le processus vers une certaine direction, il va l'orienter afin que son équipe se concentre particulièrement sur le groupe des OIs adéquats à l'obtention des résultats attendus.
- la réorganisation et la réorientation de l'équipe de conception en fonction des cycles de dépendances trouvées, pour réduire la durée du processus de conception. La réduction des durées se fait par l'abandon du travail sur certains OIs qui ne conduisent pas aux solutions pertinentes ou par la réorganisation du travail sur les OIs selon l'ordre indiqué par la matrice DSM réordonnée.

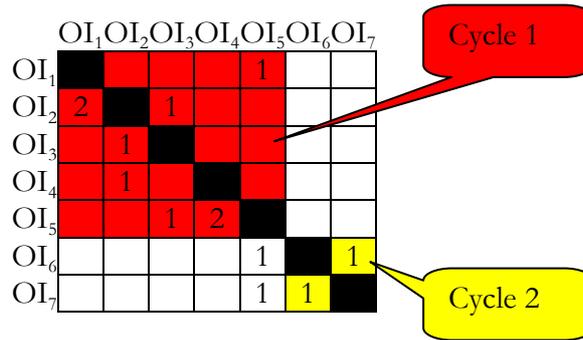


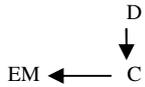
Figure 57- Identification des cycles séparables des OIs dans la matrice DSM

5.3.4 Analyse des interactions entre les participants à la conception

En général, les participants à la conception peuvent être classés en trois catégories :

- Dirigeant (D) : responsables de projet ou personnes en charge avec le pilotage du projet.
- Concepteur (C) : concepteurs qui participent à la création du produit.
- Expert Métier (EM) : participants appartenant à des métiers annexes à la conception (matériaux, marketing, production, achat, etc.).

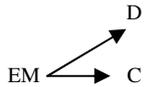
A partir de ces trois catégories, nous avons établi une typologie des interactions entre les participants à la conception (Figure 58). Cette typologie peut être utilisée comme base d'analyse du processus de conception pour identifier les itérations de conception entre les différents intervenants.



a. EM est sollicité pour son statut d'expert dans son domaine (matériaux, marketing, production, etc.), afin d'effectuer un diagnostic en validant ou invalidant les choix proposés.



b. Dans cette situation, l'intervention de EM est décalée vers l'amont du projet par rapport au premier cas et il peut ainsi ouvrir l'espace des solutions grâce à ses propres connaissances.



c. EM prend l'initiative de proposer directement à D et C une idée d'application.



d. C peut lancer à D et EM une idée d'application.



e. C propose une solution à D.



f. D demande une solution à C.



g. D demande une solution à EM.



h. EM propose une solution à D.



i. C propose une solution à EM et demande une réponse.



j. EM propose une solution à C et demande une réponse.

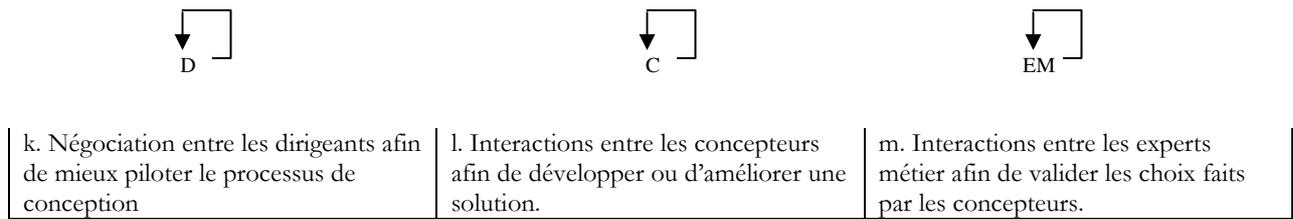


Figure 58- Les interactions possibles entre les participants à la conception

Pour la deuxième expérience (dispositif de perçage), nous avons identifié les appartenances suivantes :

- CP (Chef de projet) - fait partie de la première catégorie des dirigeants (D) ;
- SD (Spécialiste en conception de dispositifs d'usinage) – appartient à la catégorie des concepteurs (C) ;
- SM (Spécialiste en matériaux) – fait partie de la catégorie expert métier (EM).

Nous représentons sur le diagramme de GANTT de la Figure 59 le déroulement du processus de conception de cette expérience. Les itérations s'observent ainsi à deux niveau : entre les tâches et, pour chaque tâche, entre les participants. Pour ce dernier cas, une représentation matricielle des interactions entre les participants à la conception peut être utilisée.

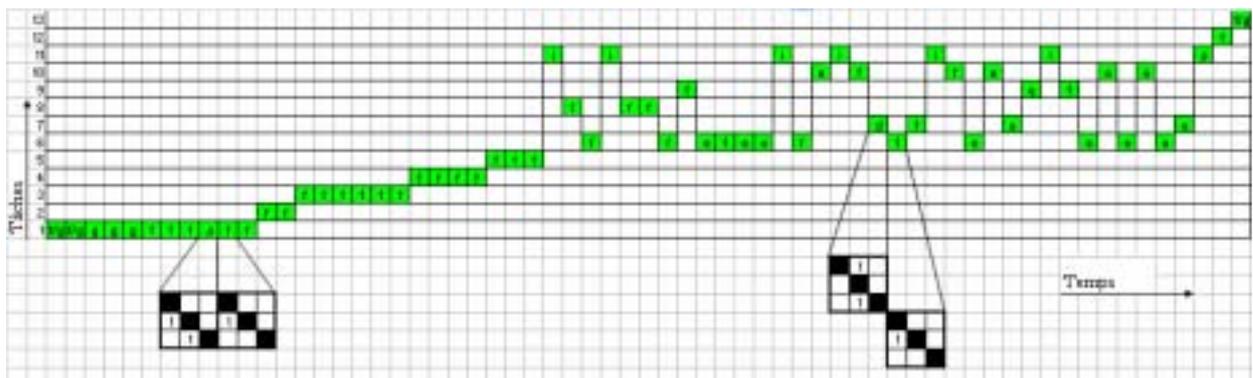


Figure 59- Le type d'interactions pendant le déroulement du processus de conception

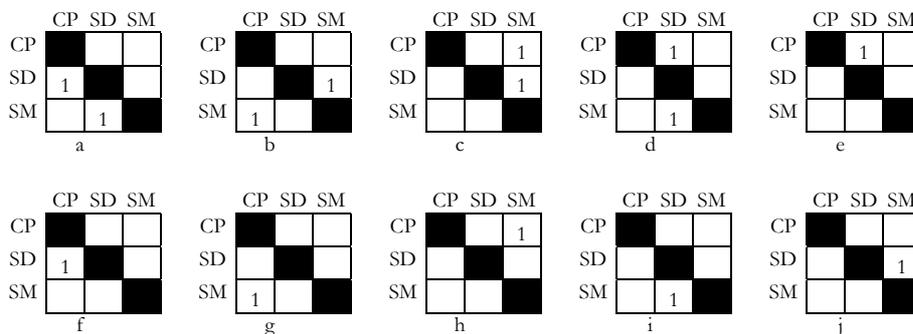


Figure 60- La représentation matricielle des interactions entre les participants à la conception

5.3.5 Analyse fonctionnelle du produit

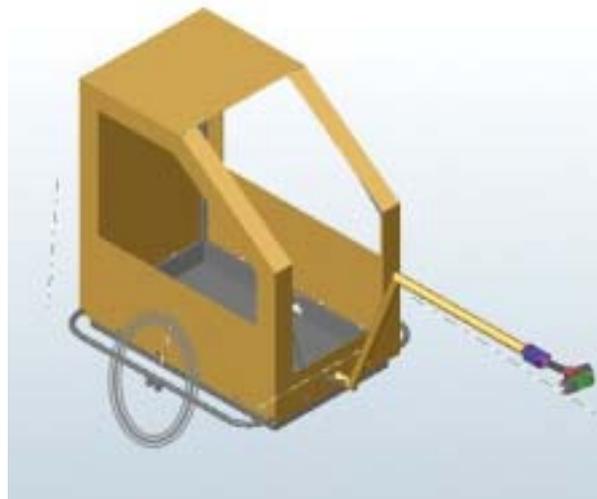
Une analyse, à un niveau macro, du processus de conception nécessite l'identification des tâches (ou activités) de conception. Différents moyens peuvent être utilisés à cette fin : analyse fonctionnelle, analyse des objets intermédiaires, analyse des enregistrements du déroulement du processus, etc. Pour identifier les tâches dans la troisième expérience (expérience GRACC), nous avons utilisé l'analyse fonctionnelle et l'analyse des enregistrements vidéo de l'expérience.

La première étape de cette analyse est d'identifier les fonctions du produit. On considère le produit comme un moyen d'interagir avec le milieu extérieur. La fonction est, alors, l'action du produit ou de l'un de ses constituants exprimée exclusivement en termes de finalité. On distingue les fonctions associées aux différentes actions d'un produit par leur nature :

- Les fonctions principales (FP) : elles expriment les services rendus par le produit pour répondre aux besoins des utilisateurs.
- Les fonctions contraintes (FC) : elles traduisent les exigences d'adaptation du produit au milieu extérieur.

Afin de faciliter l'analyse des fonctions de notre produit (remorque de VTT), il a été décomposé en trois sous-ensembles :

- Le timon.
- Le châssis.
- La capote.



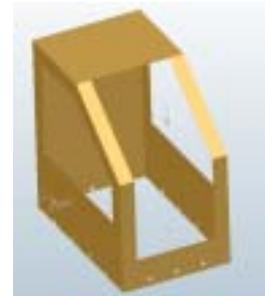
La remorque représentée en 3D



Le timon



Le châssis



La capote

Figure 61- Les trois parties du produit

L'application de l'analyse pour notre produit (la remorque VTT) fait apparaître les fonctions de service (Figure 62). La totalité des fonctions est présentée dans le Tableau 5.

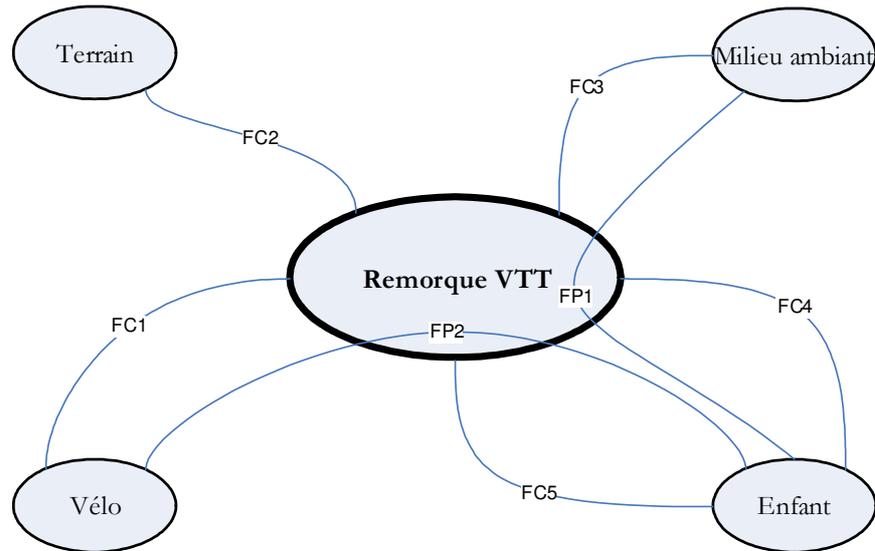


Figure 62- Les fonctions de service pour le produit « Remorque VTT pour enfant »

Les fonctions de service

Les fonctions principales

FP1 - Protéger l'enfant des influences du milieu extérieur.

FP2 - Assurer le déplacement d'enfant avec le vélo.

Les contraintes

FC1 - Possibilité d'être attaché à un vélo.

FC2 - Etre utilisable sur tous les types de terrain.

FC3 - Résister à l'action du milieu extérieur.

FC4 - Permettre l'entrée/la sortie de l'enfant dans ou de l'intérieur.

FC5 - Assurer l'ambiance intérieure pour l'enfant.

Les fonctions techniques

Le châssis :

- Etre capable de soutenir le poids de l'enfant.
- Permettre l'attachement des roues.
- Assurer le lien avec le timon.
- Permettre un montage/ démontage rapide.
- Permettre l'attachement d'un siège pour l'enfant.

Le timon :

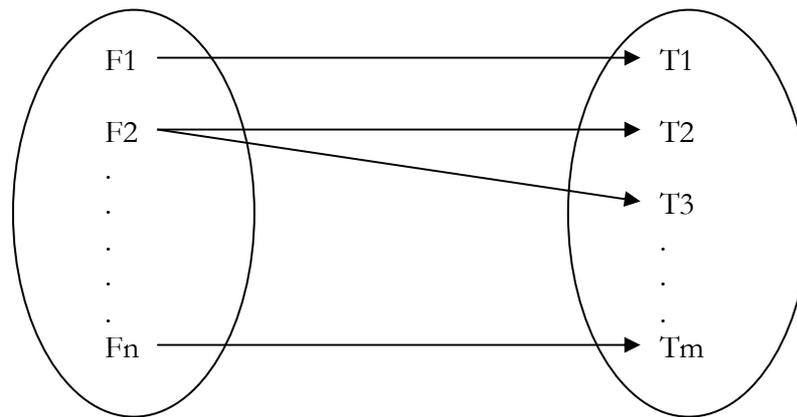
- Assurer le lien entre le vélo et la remorque.
- Permettre le montage/ démontage facile.

La capote :

- Etre facile à monter sur le châssis.
- Avoir la possibilité d'être attachée au châssis.

Tableau 5 – Les fonctions du produit

Pour concevoir le produit, les concepteurs doivent réaliser le passage du fonctionnel vers le structurel. Ce passage est réalisé par l'exécution d'un certain nombre des tâches de conception. Ces tâches sont liées aux fonctions du produit (Figure 63).



F1,..., Fn – les fonctions du produit ;
T1,..., Tm – les tâches de conception
correspondantes

Figure 63- Couplage fonction/tâche

A partir des fonctions recensées auparavant, nous avons identifié les tâches suivantes, nécessaires à la réalisation du produit :

- 1 Présentation du problème ;
- 2 Proposition d'une nouvelle forme pour le châssis ;
- 3 Analyse des solutions existantes sur la liaison châssis – vélo ;
- 4 Analyse des solutions pour le timon ;
- 5 Liaison avec le timon ;
- 6 Proposition de serrage entre le timon et la selle ;
- 7 Développement des solutions proposées pour le serrage ;
- 8 Proposition d'une nouvelle liaison ;
- 9 Validation de la solution pour le serrage ;
- 10 Analyse de la solution pour le châssis ;
- 11 Assemblage du châssis ;
- 12 Fixation du siège ;
- 13 Choix des matériaux pour le châssis ;
- 14 Développement de la solution choisie pour le châssis ;
- 15 Evaluation du point de vue du coût ;
- 16 Propositions sur la forme de la capote ;
- 17 Evaluation du point de vue du confort ;
- 18 Choix du siège ;
- 19 Choix de matériau pour la capote ;
- 20 Evaluation de l'étanchéité de la capote ;
- 21 Evaluation du point de vue de l'ouverture de la capote ;
- 22 Optimisation de la forme de la capote ;
- 23 Evaluation du point de vue de la sécurité ;
- 24 Développement de la solution choisie pour la capote ;
- 25 Validation de la solution pour la capote.

Pour une analyse plus détaillée, chaque tâche de conception peut être détaillée en tâches plus fines. Par exemple, pour le serrage entre le timon et la selle nous avons identifié : *serrage rapide* ; *serrage avec une vis et une clé* ; *serrage avec vis à main*.

5.4 Identification des itérations sur les expériences étudiées

5.4.1 L'identification des itérations sur la première expérience

Afin d'identifier les itérations produites dans la première expérience, nous avons utilisé une représentation graphique du déroulement du processus de conception. Sur ce graphe, les quatre phases de conception sont distinguées. En fonction du temps, les principaux actes de conception [GARR 01] sont placés sur le graphe dans la phase correspondante (Figure 64).

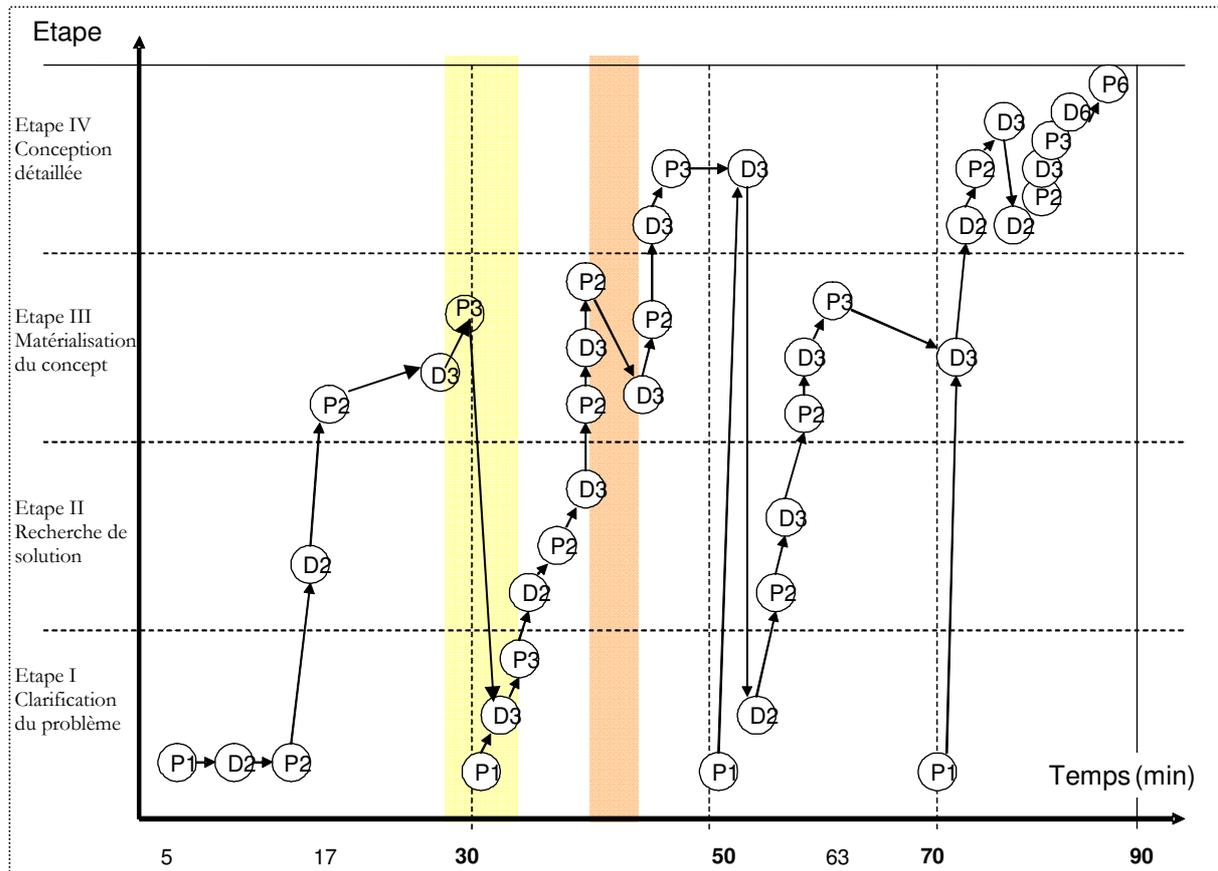


Figure 64- Le déroulement de la première expérience représentée par les actes de conception

D	Demande	1	Information	4	Organisation
P	Proposition	2	Solution	5	Accord
		3	Evaluation	6	Décision

Figure 65- Codification des actes de conception selon GARRO [GARR 01]

La distinction des phases a été faite en analysant l'enregistrement vidéo et les objets intermédiaires produits par les participants. Notons au passage que la plupart des solutions ont été proposées sous forme verbale ou gestuelle. En effet, le problème traité est assez simple et le produit ne présente pas une complexité importante.

Après 17 minutes, une première solution sur une nouvelle forme du produit est proposée. Elle est matérialisée par le changement de phase sur le graphe.

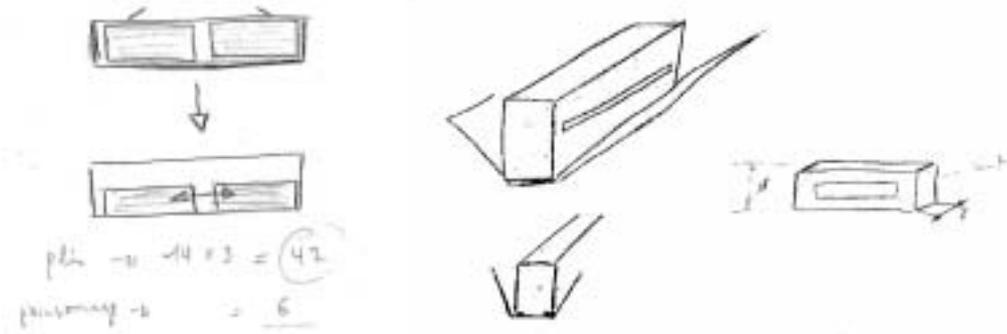


Figure 66- Recherche de solutions et premiers objets intermédiaires

Chaque solution doit être évaluée par rapport aux contraintes, afin de chiffrer son coût. Après analyse de la première solution, les acteurs proposent des changements majeurs sur la forme du paquet. Souvent, ils réutilisent les propositions déjà faites auparavant.

A 28min et 17s, le processus de conception est déjà au niveau de l'étape III de la conception (Matérialisation du concept). A ce moment, le concepteur C2 propose, aux autres participants, une solution pour l'assemblage du paquet.

A 30min 25s, le Modérateur (M) (le commanditaire du projet) intervient pour annonce des changements au niveau des coûts des matériaux et des opérations de fabrication. A cause de cette intervention et des nouveaux changements, les concepteurs passent à la première étape de conception (Clarification du problème). Nous avons une itération dans notre processus. Le modérateur interviendra deux autres fois plus tard. Ses interventions créent des itérations pour revenir à la première phase. Les concepteurs peuvent intégrer les changements et modifier les solutions proposées. Dans ce cas, les itérations seront longues. Ils peuvent aussi les ignorer, et dans ce cas, ils reprennent le cours de leur processus plus rapidement.

De la 36^{ème} mn à la 39^{ème} mn, on peut remarquer des retours arrière sur le graphe. Ils concernent la même phase de conception. Il s'agit là de quelques solutions intermédiaires examinées et affinées par les participants. Dans ces itérations, les changements ne sont pas considérables, mais elles sont nécessaires pour améliorer la solution proposée.



Figure 67- Objets intermédiaires des solutions retenues

La solution retenue (Figure 67) a été détaillée et chiffrée. Une maquette a été aussi réalisée (Figure 68). L'expérience s'est terminée dans le temps alloué aux participants.

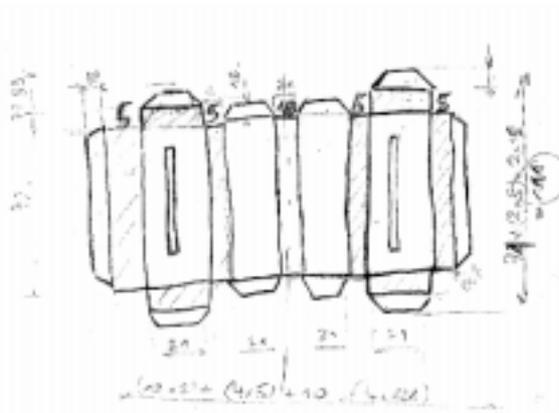


Figure 68- Conception détaillée et chiffrage de la solution retenue

5.4.2 L'identification des itérations sur la deuxième expérience

La deuxième expérience de conception a un caractère routinier. Les tâches nécessaires pour sa réalisation ont été identifiées a priori. Ces tâches sont les suivantes :

1. Etablir les données nécessaires pour le processus ;
2. Etablir les cotes et le système de cotation ;
3. Le système d'orientation et des éléments d'orientation ;
4. La fixation de la pièce pour perçage ;
5. Concevoir les éléments d'orientation de la pièce ;
6. Concevoir le corps du dispositif ;
7. Choix des matériaux ;
8. Concevoir des éléments pour orienter l'outil coupant ;
9. Concevoir des éléments pour la fixation de la pièce ;
10. Concevoir le système d'indexation pour le dispositif ;
11. Concevoir des éléments auxiliaires ;
12. Etablir les cotes fonctionnelles du dispositif.
13. Les conseils techniques concernant le fonctionnement du dispositif.

Les liens informationnels entre ces tâches sont prévisibles. A l'aide d'une matrice DSM, nous pouvons représenter les dépendances entre les tâches de conception pour mettre en évidence le flux d'information en sens direct et aussi le flux d'information en sens inverse (Figure 69). Les éléments de la partie diagonale supérieure de la matrice représentent les itérations volontaires, nécessaires au déroulement du processus de conception. Ces itérations ont comme sources l'interdépendance entre les tâches de conception.

Les tâches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Etablir les données nécessaires pour le processus	1												
2. Etablir les cotes et le système de cotation	1	1											
3. Le système d'orientation et des éléments d'orientation	1	1	1										
4. Concevoir les éléments d'orientation de la pièce ;		1	1	1		2							
5. La fixation de la pièce pour perçage ;		1	1		1								
6. Concevoir le corps du dispositif ;	1				1	2	2	2	2	2			
7. Concevoir des éléments pour orienter l'outil coupant					2	2	1	2	2	2			
8. Concevoir des éléments pour la fixation de la pièce		1				2	2						
9. Concevoir le système d'indexation pour le dispositif				1	2	2		1					
10. Concevoir des éléments auxiliaires	1	1				2			1				
11. Choix des matériaux ;	1					1	2		1		1		
12. Etablir les cotes fonctionnelles du dispositif.		1			1		1		1			1	
13. Les conseils techniques concernant le fonctionnement du dispositif													1

Figure 69- Représentation matricielle des liens entre les tâches de conception pour la deuxième expérience

Les éléments de la matrice DSM ont été notés par « 1 » ou « 2 » en fonction du degré de chevauchement des tâches de conception (Figure 70).

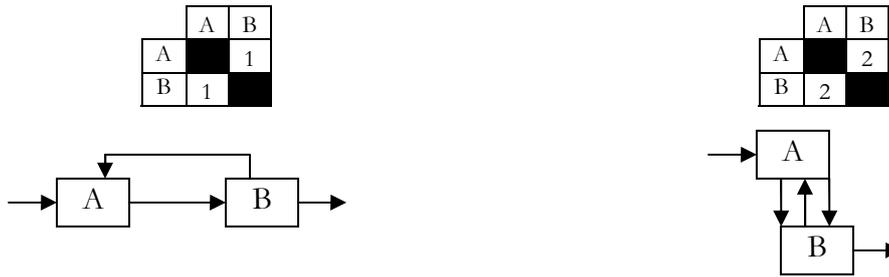


Figure 70- Codification des liens entre les tâches en fonction du degré de chevauchement

Afin de réduire les itérations (les éléments de la partie triangulaire supérieure dans la matrice DSM), nous avons utilisé l’algorithme de diagonalisation de la matrice DSM. Cet algorithme permet de réordonner les tâches de conception afin de réduire les éléments de la partie triangulaire supérieure ou de les approcher de la diagonale principale. Les tâches réordonnées sont données sur (Figure 71).

Les tâches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Etablir les données nécessaires pour le processus	■												
2. Etablir les cotes et le système de cotation	1	■											
3. Le système d’orientation et des éléments d’orientation	1	1	■										
4. Concevoir les éléments d’orientation de la pièce ;		1	1	■									
5. La fixation de la pièce pour perçage ;		1	1		■	2	■	■	■	■			
6. Concevoir le corps du dispositif ;	1			1	■	■	2	2	2	2			
7. Concevoir des éléments pour orienter l’outil coupant		1			■	2	■	2	■				
8. Concevoir des éléments pour la fixation de la pièce				2	1	2	■	■	■				
9. Concevoir le système d’indexation pour le dispositif	1	1			■	2	■	■	■				
10. Concevoir des éléments auxiliaires	1				■	1	2	■	1	■			
11. Choix des matériaux ;				2		2	1	2	2	2	■		
12. Etablir les cotes fonctionnelles du dispositif.		1	1				1		1			■	
13. Les conseils techniques concernant le fonctionnement du dispositif												1	■

Figure 71- Matrice DSM réordonnée.

Dans ce cas, les concepteurs ont une vision au préalable sur l’enchaînement des tâches à suivre et sur les itérations volontaires (ceux qui peuvent être prévues). Ainsi, le ré-ordonnancement de la matrice DSM peut nous aider à donner des prescriptions aux concepteurs pour améliorer le déroulement du processus de conception, par la réduction des itérations volontaires.

Pendant le déroulement de l’expérience de conception d’autres types d’itérations ont été observées. Afin d’identifier ces itérations, nous avons considéré plusieurs critères : les tâches de conception, les interventions et les actions réalisées par les participants, les objets intermédiaires et le type d’interactions entre les participants. Pour cela, nous avons utilisé une base de données, permettant d’analyser les éléments extraits de l’expérience, afin de bien mettre en évidence les itérations observées (Figure 72).

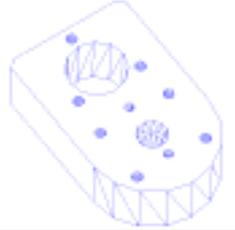
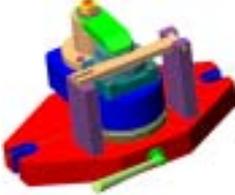
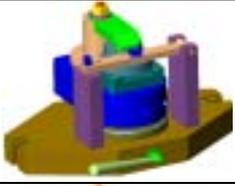
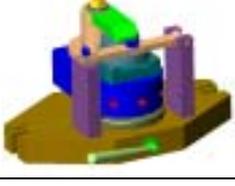
Temps (mn)	Action	Tâche	Métier CP/SD/SM			Objets Intermédiaires	Type d'interaction
.....							
592	Etablir la forme pour le corps du dispositif	6	*	*			f
625	Concevoir les éléments d'orientation pour l'outil coupant	7	*	*			f
636	Choix des matériaux pour les éléments d'orientation d'outil coupant	11		*	*	Fichier texte avec les caractéristiques des matériaux	i
640	Définir la portion de fixation du dispositif	10	*	*			f
645	Etablir la forme pour le corps du dispositif	6	*	*			e
.....							
652	Le système de fixation de la plaque qui soutient le manchon d'orientation de l'outil coupant et l'installation du manchon.	7	*	*			e
681	Le système d'indexation : trous + insertion des manchons dans la plaque de base	9	*	*			e
.....							
769	Le système de fixation pour la plaque qui soutient le manchon d'orientation de l'outil coupant (modification du système de fixation et de la forme pour la plaque).	7	*	*			e

Figure 72- Extrait de la base de données (deuxième expérience)

L'analyse de la base de données permet de mettre en évidence les itérations observées. Par exemple, à 769mn SD propose à CP une nouvelle solution pour le système de fixation de la plaque qui soutient le manchon d'orientation de l'outil coupant. Cette solution a été proposée afin de réduire les temps nécessaires pour l'installation et l'extraction de la pièce sur dispositif de perçage. Cette nouvelle solution suppose la modification de quelques éléments (Figure 73) :

- modifications de la plaque verticale,
- modification de la plaque qui soutient le manchon d'orientation de l'outil coupant,
- remplacement de la vis spéciale de blocage de la plaque qui soutient le manchon d'orientation de l'outil coupant par une fourche basculante qui donne la possibilité d'installer et de désinstaller la pièce sur le dispositif dans un temps plus court.

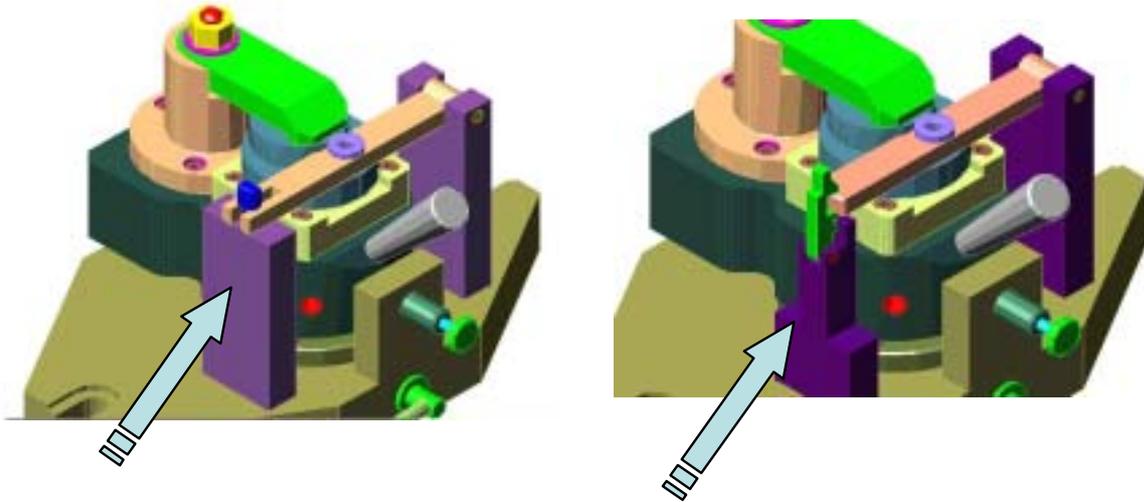


Figure 73- Modifications réalisées à cause du changement d'une solution partielle pour le système de fixation

Dans ce cas, nous observons une itération (Figure 75, zone B) à caractère involontaire, elle n'a pas été prévue auparavant. Cette itération n'a pas influencé les autres tâches de conception. Les modifications nécessaires ont été effectuées seulement sur le système d'orientation de l'outil coupant. L'itération a donc comme source un changement d'objectif au niveau local (le temps pour l'installation de la pièce sur le dispositif). Elle a un apport positif sur la valeur ajoutée du produit.

Un deuxième exemple concerne des itérations courtes observées entre les tâches 6 et 10. Elles sont causées par l'interdépendance des tâches. Les participants à la conception ne peuvent pas concevoir les éléments auxiliaires du dispositif qui viennent en contact avec le corps du dispositif sans apporter des modifications sur sa forme. Pour concevoir la manette par laquelle l'utilisateur va réaliser la rotation du dispositif (l'indexation) les participants font des interventions successives sur la forme de la plaque de base et sur la manette de rotation (Figure 75, zone D).

Pour avoir une vue d'ensemble sur le déroulement du processus de conception, nous avons utilisé un diagramme de GANTT (Figure 74). Pour sa réalisation, nous avons utilisé la base de données établies ci-dessus. Sur ce diagramme, nous avons la représentation de chaque tâche dans le temps, et ses itérations.

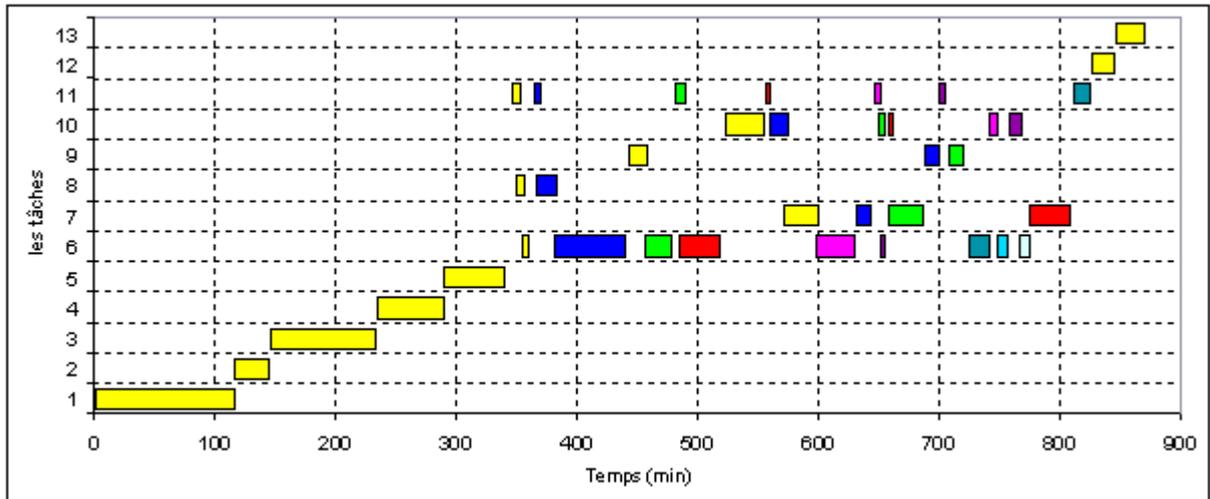


Figure 74- Le diagramme de GANTT du processus de la 2^{ème} expérience

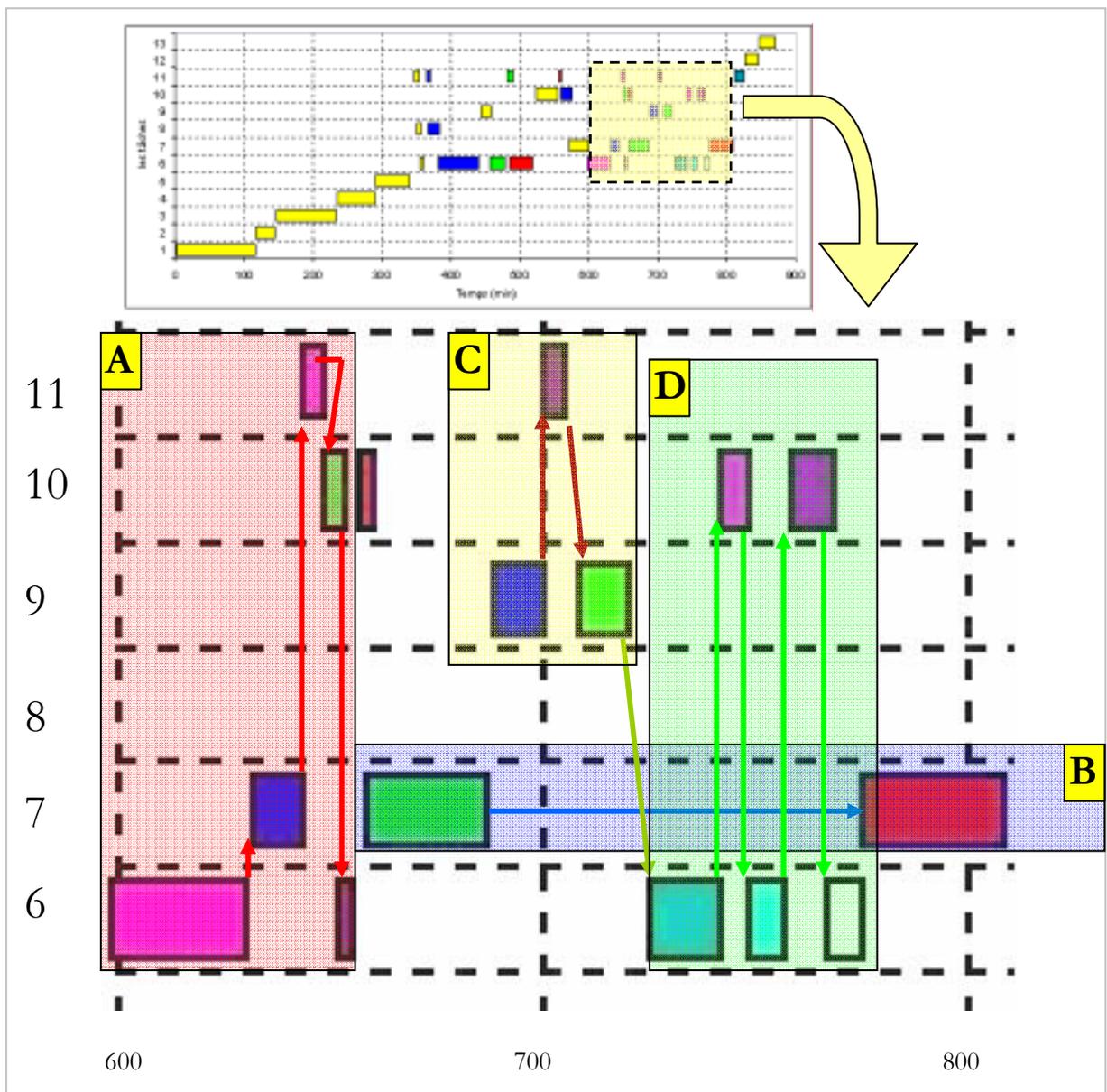


Figure 75- Identification des itérations entre les tâches sur le diagramme de GANTT

Dans le Tableau 6, nous résumons les résultats obtenus sur l'analyse des itérations selon leurs sources et leurs types.

SOURCES	TYPOLOGIE
Le changement d'objectifs 39%	Volontaires 66%
	Involontaires 34%
Les erreurs de conception 13%	Courtes 74%
	Longues 26%
L'interdépendance entre activités 48%	Constructives 96%
	Exploratoires 4%

Tableau 6– Les itérations selon les sources et les types (2^{ème} expérience)

5.4.3 L'identification des itérations sur la troisième expérience

En utilisant les vidéos, les corpus et l'analyse fonctionnelle du produit conçu, nous avons pu identifier les tâches de conception relatives à la troisième expérience (expérience GRACC). Ces tâches ont été présentées dans la première partie de ce chapitre (§5.3.5).

Le déroulement du processus a été représenté par un diagramme de GANTT (Figure 76). Pour chaque tâche, nous avons une première occurrence, puis des retours qui peuvent être soit des itérations soit une continuation de la tâche.

Notons aussi que lors d'une itération, la tâche n'est pas forcément répétée dans sa totalité. L'itération peut porter sur un élément particulier ou une portion particulière de la tâche. De plus, pendant le déroulement du processus de conception, certaines tâches et certaines itérations sont réalisées en parallèle ou en chevauchement. Ainsi, la durée totale du processus de conception n'est pas la somme des durées de toutes les tâches et leurs itérations.

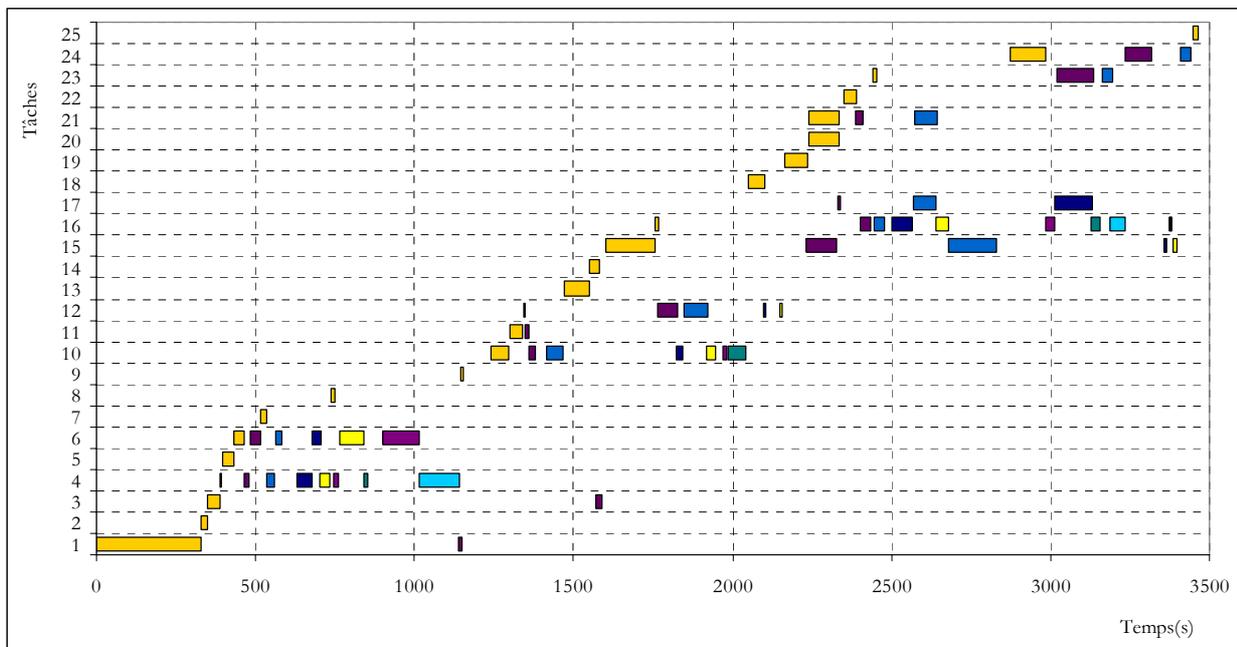


Figure 76- Le diagramme du GANTT du processus

Les liens entre les tâches peuvent être représentés sur une matrice DSM (Figure 77). Ce type de représentation peut être utilisé a posteriori pour analyser et réordonner les tâches afin de réduire le délai du processus de conception. Cette démarche est particulièrement intéressante dans un processus de conception routinier. Pour cette expérience, nous avons simulé le déroulement du processus, dans les mêmes conditions d'itérations, en réorganisant la matrice DSM. LA démarche et les résultats de la réorganisation sont présentés dans l'annexe 2.

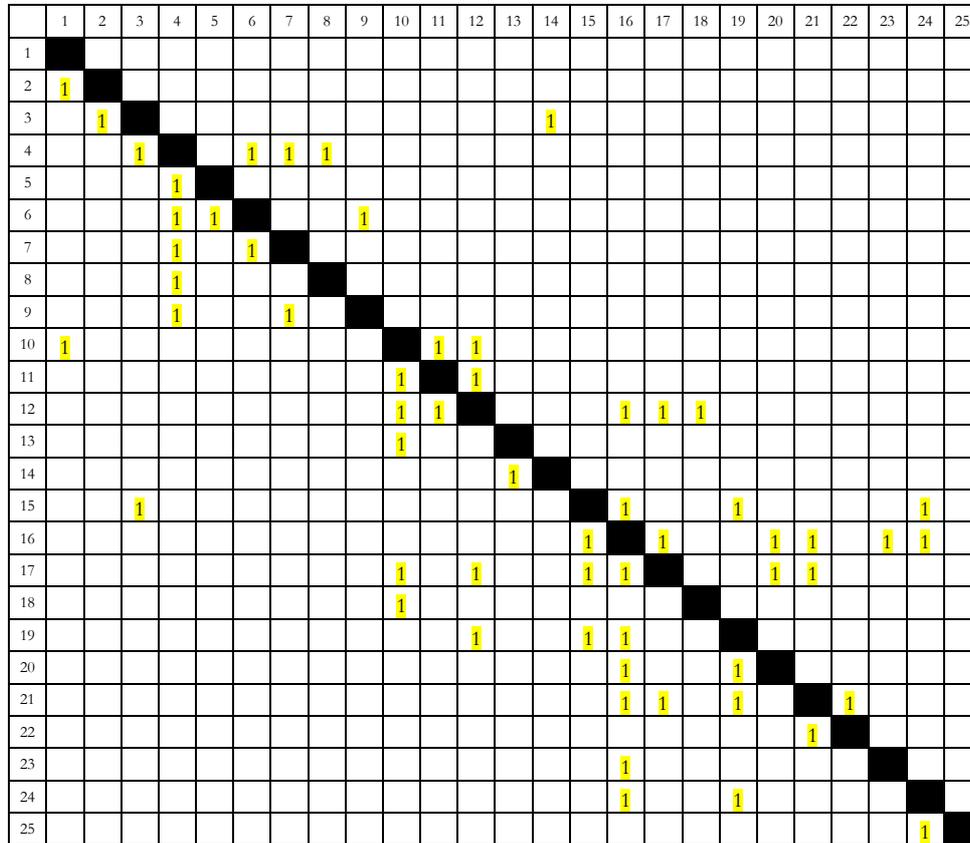


Figure 77- La matrice DSM du processus

Dans le Tableau 6, nous résumons les résultats obtenus sur l'analyse des itérations selon leurs sources et leurs types pour la troisième expérience.

SOURCES	TYPLOGIE
Le changement d'objectifs 24%	Volontaires 33%
	Involontaires 67%
Les erreurs de conception 25%	Courtes 71%
	Longues 29%
L'interdépendance entre activités 51%	Constructives 77%
	Exploratoires 23%

Tableau 7- Les itérations selon les sources et les types (3^{ème} expérience)

5.5 Conclusions

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les analyses réalisées sur les trois expériences de conception. Nous avons d'abord présenté les méthodes d'analyse qu'on peut utiliser pour étudier les itérations en conception. Le choix d'une méthode d'analyse se fait en fonction du niveau de décomposition du processus de conception que l'observateur considère.

Les méthodes abordées sont :

- L'analyse des actes de conception.
- L'analyse du modèle FBS du processus de conception.
- L'analyse des interactions entre les participants.
- L'analyse des objets intermédiaires.
- L'analyse fonctionnelle.
- L'analyse de la matrice DSM.
- L'analyse de déroulement par le diagramme de GANTT.

Ces analyses ont permis d'identifier de nouvelles sources génératrices d'itérations : *les itérations causées par les buts différents, la divergence des dialogues dans une négociation et le niveau de satisfaction d'un compromis ; les itérations fonctionnelles, structurelles et comportementales.*

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons présenté les démarches d'identification des itérations dans les trois expériences de conception. Une quantification des itérations, relative à leurs sources et types, a été faite pour les deuxième et troisième expériences.

La possibilité d'aborder la quantification des itérations est très importante pour développer des indicateurs de performance.

CHAPITRE 6

APPROCHE D'EVALUATION DES PERFORMANCES DU PROCESSUS DE CONCEPTION

6 APPROCHE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DU PROCESSUS DE CONCEPTION

6.1 Introduction

Le déroulement du processus de conception peut être soumis à des perturbations. Les risques induits par ces perturbations peuvent être considérables. Ainsi, le déroulement du processus doit être bien surveillé. Le responsable du projet doit savoir à tout moment quelles sont les caractéristiques du processus pour pouvoir intervenir le cas échéant.

Il est ainsi nécessaire d'avoir des outils capables de caractériser le processus de conception à un moment donné et/ou de réaliser l'évaluation de ses performances. Ces outils seront basés sur l'interprétation d'une série d'indicateurs de performance.

Dans ce chapitre, nous proposons de développer deux types d'indicateurs de performance :

- Les indicateurs de processus (de suivi), utiles pour une évaluation continue de la conception pendant le déroulement du processus.
- Les indicateurs de résultat, utiles pour une évaluation a posteriori des performances du processus de conception.

6.2 Performances et indicateurs de performance du processus de conception

En conception, la performance peut être liée à la manière dont se déroule le processus ou/et à son résultat. Les objectifs de l'évaluation de performance varient en fonction des moments de sa réalisation :

- Soit l'évaluation est intégrée aux diverses phases du processus de conception. On parle dans ce cas d'évaluation itérative (a priori). L'amélioration du processus de conception se fait en continu.
- Soit l'évaluation se déroule après la conception (a posteriori). L'évaluation sert alors à valider le processus étudié ou améliorer un nouveau processus.

Bonnefous [BONN 01] définit *l'indicateur de performance* comme « une information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif, ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat ».

Dans notre travail, un indicateur de performance doit porter une information sur la fluidité du processus de conception et les itérations de conception. Généralement, l'indicateur est calculé à partir de paramètres donnant des indications sur l'évolution du processus ou décrivant l'état du processus à un moment donné.

Un indicateur ne présente d'intérêt que s'il est interprétable. Nous pouvons distinguer deux types d'indicateurs :

- *Explicitement normatif*, si l'on est en présence d'une cible que l'on cherche à atteindre. Dans ce cas, l'analyse de l'écart par rapport à la norme implique un jugement sur l'atteinte d'objectifs ;
- *Implicitement normatif*, si l'on est en présence d'un jugement à opérer alors que la base de comparaison est floue.

Pour développer des indicateurs de performance du processus de conception, nous avons adopté la démarche résumée sur la Figure 78.

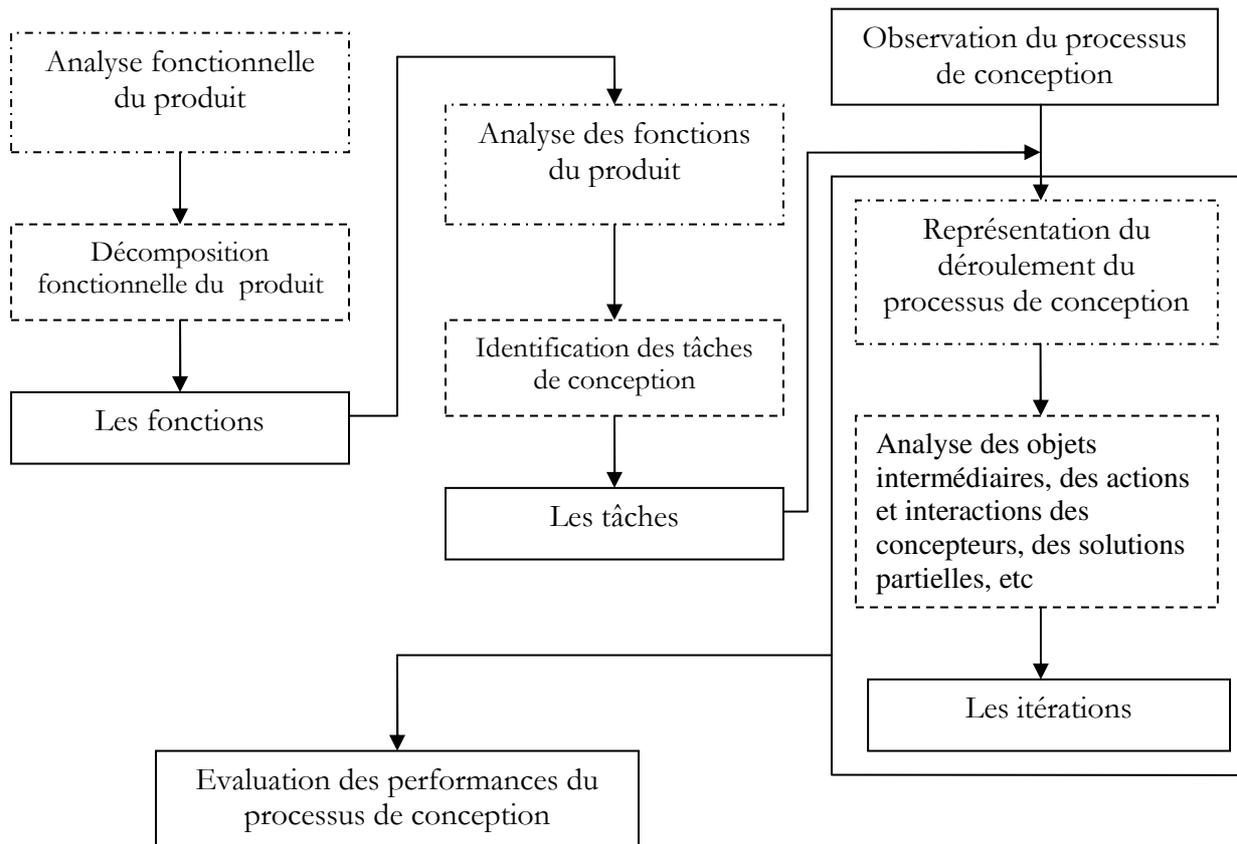


Figure 78- La démarche proposée pour évaluer les performances du processus de conception

Les itérations s’appréhendent selon deux aspects dans le cadre de l’évaluation des performances du processus de conception :

- la mesure du temps passé en itérations,
- le type d’itération observée (origine, importance, phase du processus concernée, etc.).

Dans ce qui suit, nous proposons de développer plusieurs indicateurs, de résultat et de processus. Un bilan fera ressortir ensuite une synthèse sur leur utilisation et leur difficulté de mise en œuvre.

6.3 Approche de développement des indicateurs de résultat

L’objectif de cette partie est de présenter des indicateurs de résultat proposés pour évaluer l’efficacité du processus de conception. Les indicateurs seront construits sur la base de l’étude réalisée sur les itérations de conception.

L’évaluation a posteriori des performances du processus de conception a comme but la mise en évidence de ses points forts et faibles. Elle peut fournir aux chefs de projets ainsi qu’aux concepteurs des informations utiles concernant le déroulement du processus, celles-ci étant indispensables à l’enrichissement de leur savoir-faire pour le pilotage et la réalisation d’autres processus.

6.3.1 Indicateur d’itérations

Cet indicateur montre quantitativement le poids des itérations dans un processus de conception. Il est défini par l’expression suivante :

$$I_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Titér_{i,j}}{T_{total}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Où :

i, j : sont des variables ;

n : est le nombre total de tâches de conception ;

k : est le nombre total d'itérations pour la tâche « i ».

$Titér_{i,j}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » de la tâche « i ».

T_{total} : est le temps total nécessaire pour réaliser le processus de conception.

Un poids proche de 100% montre qu'il y a un nombre très élevé d'itérations dans le processus et, par conséquent, ses performances sont faibles. Par contre, un poids d'itérations proche de 0% montre qu'on a un processus de conception d'une très bonne fluidité. En conséquence on peut affirmer qu'il a de bonnes performances.

Pour la troisième expérience de conception (GRACC), nous avons :

$$I_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Titér_{i,j}}{T_{total}} \cdot 100 = \frac{0+0+18+(18+25+47+33+18+15+128)+\dots+(80+31)+0}{3440} \cdot 100\%$$

$$I_i = 35,55\%$$

6.3.2 Indicateur de changement d'objectifs

Pour mettre en évidence et calculer le temps passé en itérations à cause des changements d'objectifs, nous proposons l'indicateur I_{chobj} . Il se calcule comme suit :

$$I_{chobj} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^g Tchobj_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Titér_{i,j}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Où :

i, j : sont des variables ;

n : est le nombre total de tâches de conception ;

k : est le nombre total d'itérations pour la tâche « i ».

g : est le nombre total d'itérations produites à cause du changement d'objectifs, pour la tâche « i » ;

$Tchobj_{i,j}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » produite à cause du changement d'objectifs pour la tâche « i » ;

$Titér_{i,j}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » pour la tâche « i ».

Pour l'expérience de GRACC, nous avons $I_{chobj} = 24\%$.

6.3.3 Indicateur d'interdépendance entre les activités

Pour calculer le taux du temps passé à cause des interdépendances entre les activités/tâches de conception nous proposons l'indicateur suivant :

$$I_{\text{int erdep}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{\text{interdep}_{i,j}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k T_{\text{iter}_{i,j}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Où :

i, j : sont des variables ;

n : est le nombre total de tâches de conception ;

k : est le nombre total d'itérations pour la tâche « i ».

m : est le nombre total d'itérations produites à cause des interdépendances entre les tâches de conception, pour la tâche « i » ;

$T_{\text{interdep}_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » produite à cause des interdépendances entre les tâches de conception, pour la tâche « i » ;

$T_{\text{iter}_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » pour la tâche « i ».

Pour l'expérience de GRACC, nous avons : $I_{\text{int erdep}} = 51\%$.

6.3.4 Indicateur d'erreurs de conception

Cet indicateur montre le taux du temps passé pour réaliser les itérations qui ont comme sources les erreurs de conception.

$$I_{er} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^e T_{er_{i,j}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k T_{\text{iter}_{i,j}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Où :

i, j : sont des variables ;

n : est le nombre total de tâches de conception ;

k : est le nombre total d'itérations pour la tâche « i ».

e : est le nombre total d'itérations produites à cause des erreurs de conception, pour la tâche « i » ;

$T_{er_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » produite à cause des erreurs de conception, pour la tâche « i » ;

$T_{\text{iter}_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » pour la tâche « i ».

Pour l'expérience de GRACC, nous avons : $I_{er} = 25\%$.

6.3.5 Indicateur d'intentionnalité

Cet indicateur montre qualitativement le type d'intentionnalité et quantitativement le poids de la volonté de réaliser des itérations dans un processus de conception. Il est défini par l'expression suivante :

$$I_{\text{int ention}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^f T_{vol_{i,j}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^h T_{\text{invol}_{i,j}}} \quad (5)$$

Où :

i, j : sont des variables ;
 n : est le nombre total de tâches de conception ;
 f : est le nombre total d'itérations volontaires pour la tâche « i » ;
 h : est le nombre total d'itérations involontaires pour la tâche « i » ;
 $T_{vol_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération volontaire « j » pour la tâche « i » ;
 $T_{invol_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération involontaire « j » pour la tâche « i ».

Une valeur d'indicateur d'intentionnalité supra unitaire montre que les itérations sont réalisées en général par la volonté des concepteurs pour améliorer des solutions de conception. Par contre, si l'indicateur est inférieur à l'unité, cela montre que les concepteurs n'ont pas bien maîtrisé le processus et son déroulement a été perturbé.

Pour l'expérience de GRACC, nous avons trouvé : $I_{intention} = \frac{814}{409} = 1,99 \approx 2$.

6.3.6 Indicateur d'apport (+/-)

Cet indicateur montre qualitativement l'apport des itérations et quantitativement le poids de leur apport dans un processus de conception. Il est défini par l'expression suivante :

$$I_{+/-} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p T_{it\acute{e}r+_{i,j}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^o T_{it\acute{e}r-_{i,j}}} \quad (6)$$

Où :

i, j : sont des variables ;
 n : est le nombre total de tâches de conception ;
 p : est le nombre total d'itérations constructives pour la tâche « i » ;
 o : est le nombre total d'itérations exploratoires pour la tâche « i » ;
 $T_{it\acute{e}r+_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération constructive « j » pour la tâche « i » ;
 $T_{it\acute{e}r-_{i,j}}$: est le temps passé pour réaliser l'itération exploratoire « j » pour la tâche « i ».

Une valeur supérieure à l'unité de l'indicateur d'apport montre que les itérations ont une contribution positive dans le déroulement du processus de conception. La valeur inférieure à l'unité de l'indicateur montre que les itérations eurent une influence négative. Elles sont responsables des allongements de durées nécessaires à la réalisation des tâches.

Pour l'expérience de GRACC, nous avons trouvé : $I_{+/-} = \frac{944}{279} = 3,38$.

6.3.7 Indicateur d'étape

Cet indicateur montre quantitativement les pourcentages de temps passé en itérations pour chaque étape de conception. Il est défini par l'expression suivante :

$$I_{\text{étape}_x} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \text{Titér}_{\text{étape}_x, i, j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \text{Titér}_{i, j}} \cdot 100\% \quad (7)$$

i, j, x : sont des variables ;

$x \in [1,4]$; 1, 2, 3 et 4 sont les étapes d'avancement du processus de conception, voir la Figure 79;

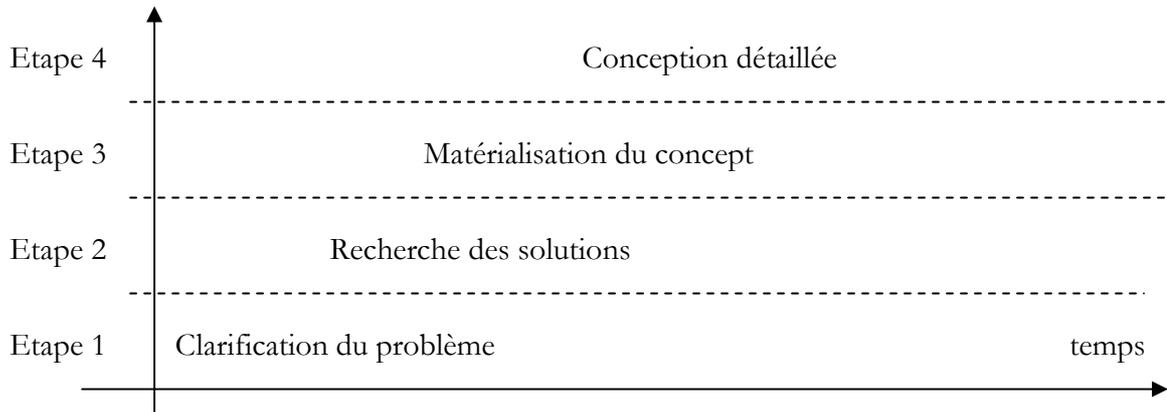


Figure 79- Les étapes d'avancement du processus de conception

q : est le nombre totale d'itérations dans l'étape x ;

n : est le nombre total de tâches de conception ;

k : est le nombre total d'itérations pour la tâche « i ».

$\text{Titér}_{\text{étape}_x, i, j}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » en étape x , pour la tâche « i » ;

$\text{Titér}_{i, j}$: est le temps passé pour réaliser l'itération « j » pour la tâche « i ».

Cet indicateur est utile dans le cas d'une analyse plus détaillée, pour donner à celui qui va l'exécuter une indication exacte sur le temps passé en itérations par chaque étape de conception.

Sur l'expérience de GRACC nous avons identifiés :

$$I_{\text{étape}_1} = \frac{11+0+3+\dots+0}{1223} \cdot 100\% = \frac{14}{1223} \cdot 100\% = 1,44\% \text{ itérations dans la première étape.}$$

$$I_{\text{étape}_2} = \frac{0+0+0+(18+25+47+33+18+15+128)+0+115+0+\dots+0}{1223} \cdot 100\%$$

$$I_{\text{étape}_2} = \frac{832}{1223} \cdot 100\% = 68,02\% \text{ itérations dans la deuxième étape.}$$

$$I_{\text{étape}_3} = \frac{0+\dots+0+(22+51+20+26+11+55)+\dots+0}{1223} \cdot 100\% = \frac{283}{1223} \cdot 100\% = 23,14\% \text{ itérations}$$

dans l'étape 3.

$$I_{\text{étape}_4} = 7,67\% \text{ itérations dans l'étape 4.}$$

Dans la Figure 80, nous montrons les pourcentages des temps passés pour réaliser les itérations dans chaque étape de conception.

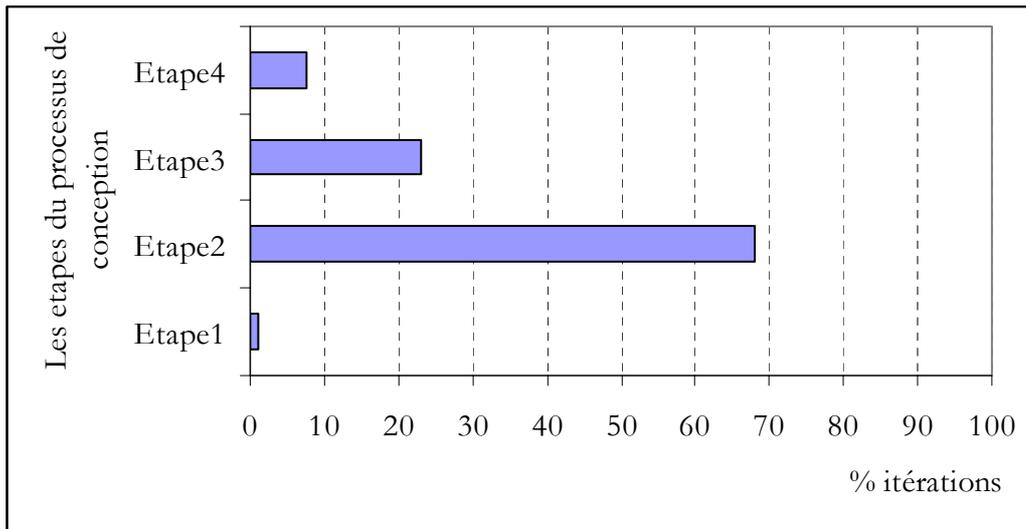


Figure 80- Les temps passés en itération par chaque étape de conception

6.3.8 Indicateur typologie - sources

Le rôle de cet indicateur est de montrer les dépendances entre chaque type d'itération et les sources génératrices d'itérations. A l'aide de cet indicateur, nous pouvons observer, par exemple, quelles sont les sources qui produisent les itérations exploratoires ou les itérations involontaires. Comme nous ne pouvons pas prévoir les itérations involontaires, le seul moyen de les réduire est d'intervenir au niveau de leurs sources génératrices. Dans ce cas, on essaiera de réduire les erreurs de conception par l'élimination des facteurs perturbateurs, par la facilitation des dialogues entre les participants, etc. Pour la troisième expérience de conception les valeurs de cet indicateur sont résumées dans le Tableau 8.

Dépendances typologie - sources			
%			
	Les changements d'objectifs	l'interdépendance	les erreurs
volontaires	23,83	76,17	0
involontaires	24,21	0	75,79
courtes	33,64	55,80	10,56
longues	0	38,07	61,93
constructives	30,08	52,44	17,48
exploratoires	3,23	44,80	51,97

Tableau 8- Représentation des dépendances typologie - sources

Sur la Figure 81, cet indicateur est représenté sous une forme graphique pour mettre en évidence plus facilement les liens typologie – sources.

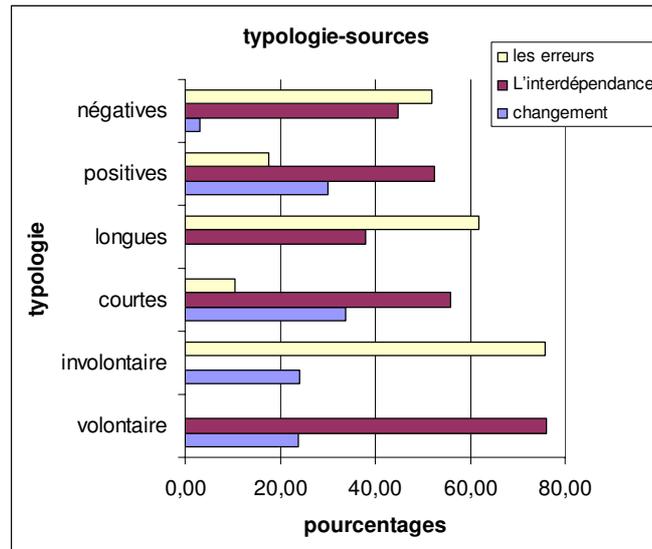


Figure 81- La représentation graphique typologie - sources

6.3.9 Indicateur sources – typologie

Par rapport à l'indicateur proposé auparavant (Typologie - sources), cet indicateur est plutôt utilisé pour mettre en évidence les effets générés par chaque source d'itération. Pour les chefs de projet, cet indicateur peut être utile dans le cas de mise en place et du pilotage d'un nouveau projet de conception.

Liens sources - typologie						
	%					
	volontaire	involontaire	courtes	longues	constructives	exploratoires
Les changements d'objectifs	66,21	33,79	100,00	0,00	96,93	3,07
L'interdépendance	100,00	0,00	78,39	21,61	79,84	20,16
Les erreurs	0,00	100,00	29,68	70,32	53,23	46,77

Tableau 9- Représentation des liens sources - typologie

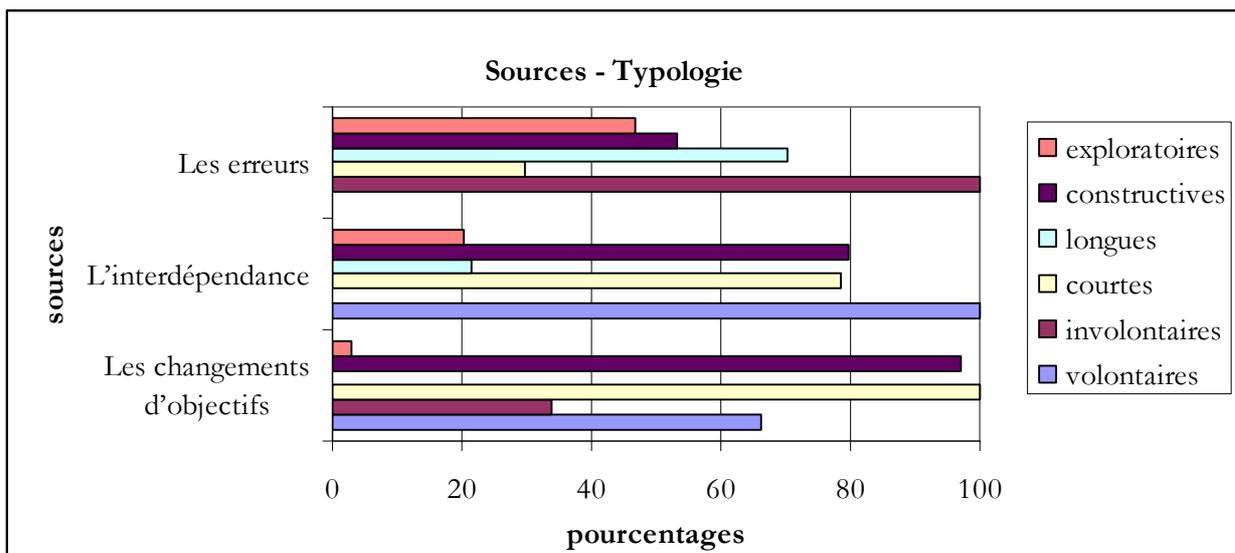


Figure 82- Représentation graphique des sources - typologie

6.3.10 Indicateur typologie – typologie

Cet indicateur montre les dépendances entre les différents types d'itérations. Par cet indicateur nous pouvons évaluer l'impact d'un certain type d'itérations sur les performances du processus de conception. Par exemple (Tableau 10), sur la troisième expérience de conception nous observons que les itérations volontaires ont un caractère positif (84,85 %) et en plus elles sont caractérisées par de courtes durées (82,42%).

Dépendances typologie - typologie						
%						
	volontaires	involontaires	courtes	longues	constructives	exploratoires
volontaires			82,42	17,58	84,85	15,15
involontaires			46,70	53,30	62,35	37,65
courtes	78,07	21,93			78,53	21,47
longues	38,07	61,93			73,86	26,14
constructives	72,99	27,01	72,46	27,54		
exploratoires	44,80	55,20	67,03	32,97		

Tableau 10- Représentation des dépendances typologie - typologie

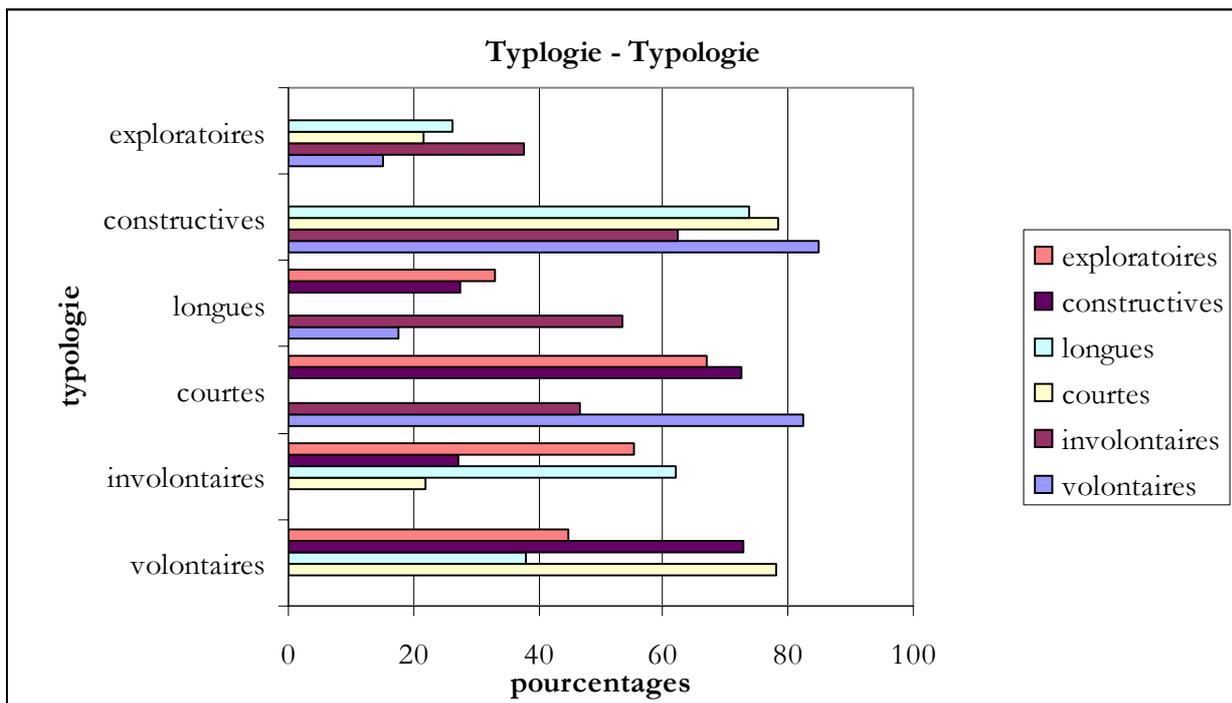


Figure 83- Représentation graphique typologie – typologie

6.4 Approche de développement des indicateurs de processus

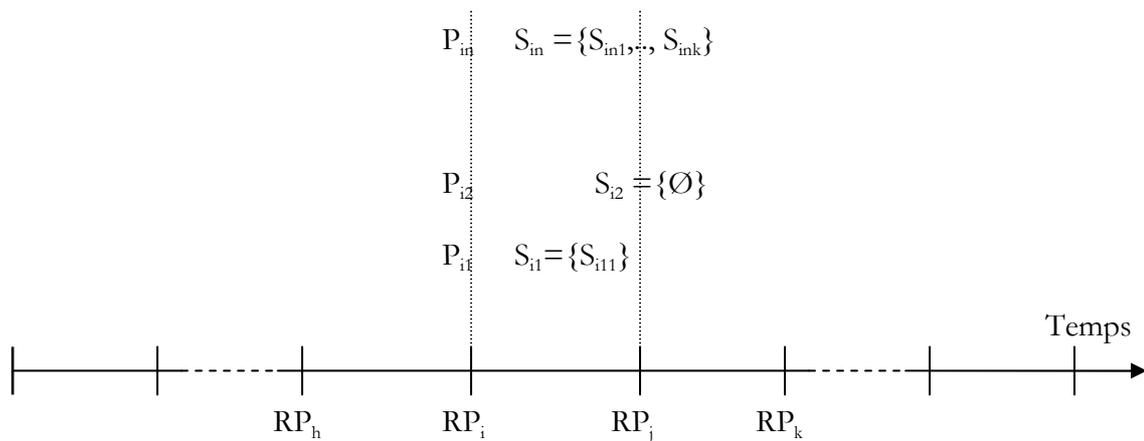
Dans cette partie, nous présentons des indicateurs de résultat proposés pour évaluer les performances du processus de conception. Comme pour le premier type d'indicateurs, on se servira de l'analyse des itérations pour construire ces indicateurs.

Avec ces indicateurs, l'évaluation du processus de conception pourra se faire pendant le déroulement de celui-ci. Ceci permet d'intervenir sur le processus pour corriger des dysfonctionnements et améliorer ses performances.

6.4.1 Indicateur de solutions proposées

Cet indicateur donne des informations concernant le risque d'avoir des itérations dans le processus de conception, introduites par les solutions proposées à un moment donné, entre deux revues projet.

Pour mieux expliquer cet indicateur et sa manière de construction, considérons le schéma présenté sur la Figure 84.



Légende : RP_i – revue projet « i » ; P_{in} – problème de conception « n » qui doit être traité de préférence entre RP_i et RP_j ; S_{in} – l'ensemble de solutions proposées à l'intérieur de l'intervalle (RP_i, RP_j) pour résoudre le problème P_{in} ; S_{in1} – la première solution de l'ensemble des solutions proposées pour répondre à P_{in} .

Figure 84- Les solutions proposées pour chaque problème de conception, entre deux revues projet

Pendant le déroulement du processus de conception, une série des problèmes de conception doivent être traités. Pour résoudre un problème, les participants proposent des solutions qui peuvent être partielles ou finales. Pour un même problème, ils peuvent proposer plusieurs solutions, une seule solution ou aucune solution dans un intervalle de temps prédéterminé. En fonction de ces éléments, nous pouvons avoir les cas suivants, voir le Tableau 11 :

- Plusieurs solutions :
 - Partielles – dans ce cas, les participants ont beaucoup de liberté d'action pour faire les choix et pour développer les solutions proposées. Souvent pour faire le choix et aussi pour développer la solution optimale, un certain nombre d'itérations est nécessaire. Ce cas est caractéristique pour les classes de conception créative et innovante.
 - Totales – dans ce cas, les participants ont une certaine liberté. Cette liberté est limitée au niveau des choix de la solution. Le risque d'avoir des itérations produites par le choix d'une certaine solution est réduit. Cette situation est caractéristique pour la classe de conception routinière ;
- Une seule solution :
 - Partielle – la solution est imposée, mais elle laisse la possibilité d'apporter des changements pour l'améliorer. Dans ce cas, au niveau local, des itérations peuvent

être réalisées pour améliorer la solution proposée, mais avec un faible impact sur le déroulement du processus de conception.

- Totale – Dans ce cas les participants disposent d’une seule solution, fermée qui ne donne aucune possibilité d’intervenir. Ce cas est assez sensible parce que l’espace des nouvelles solutions étant réduit, et le risque d’avoir des itérations dans le processus de conception est élevé.
- Aucune solution : C’est un cas assez rare, mais il peut bloquer l’avancement du processus de conception. Si c’est le cas, le chef de projet est obligé de faire appel à la sous-traitance.

Solutions proposées	Partielle	Totale
Plusieurs	Liberté des choix + liberté d’action	Liberté des choix
	Risque d’itérations, impact très réduit sur le processus de conception	Risque d’itérations, impact réduit sur le processus de conception
Une seule	Solution imposée mais donne la possibilité de l’améliorer	La solution est imposée
	Risque d’itérations, impact moyen sur le processus de conception	Risque élevé d’itérations, impact très élevé sur le processus de conception
Aucun	L’avancement du processus de conception bloqué	

Tableau 11- Types de solutions proposées – risques d’itérations diverses

L’indicateur qu’on propose a le rôle de signaler au chef de projet les problèmes de conception qui posent des difficultés et de signaler les risques d’avoir de nouvelles itérations.

Cet indicateur est défini en fonction des solutions proposées pour résoudre un certain problème de conception et aussi en fonction de l’importance du problème considéré :

$$I_{SP} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{44} \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^n P_{SS} \quad (1)$$

Où :

I_{SP} : indicateur de solutions proposées ;

La première colonne de la matrice correspond aux problèmes importants, la deuxième colonne aux problèmes ordinaires et la dernière aux problèmes qui ont une importance réduite ;

Concernant les lignes de la matrice :

- La première ligne correspond aux problèmes de conception avec une seule solution finale.
- La deuxième ligne correspond aux problèmes de conception avec une seule solution partielle.
- La troisième ligne correspond aux problèmes de conception avec plusieurs solutions totales.
- La quatrième ligne correspond aux problèmes de conception avec plusieurs solutions partielles.

Le terme libre $\sum_{i=1}^n P_{SS}$ représente la totalité des problèmes sans solution entre les deux revues projets consécutives.

Pour la deuxième expérience étudiée, entre les revues projet réalisées à 540 minutes et à 660 minutes, nous avons constaté que les participants à la conception ont proposé :

- deux solutions finales pour répondre à deux problèmes importantes de conception (*les matériaux de la tige de rotation du dispositif et des éléments d'orientation de l'outil coupant*) ;
- deux solutions finales pour résoudre deux problèmes ordinaires de conception (*la forme et les dimensions de la manette de rotation*) ;
- quatre solutions partielles pour répondre à quatre problèmes importantes (*les formes des plaques verticales, de la plaque qui soutient le manchon, la portion de fixation du dispositif, les liens entre les plaques*) ;
- une solution partielle pour résoudre un problème courant (*la forme de la manette de rotation de la tige de blocage*) ;
- plusieurs solutions (trois) partielles pour répondre à un problème courant de conception (*la forme du corps du dispositif*).

Un problème a resté sans solution entre les deux revues projet considérées (*le système de fixation de la plaque qui soutient le manchon d'orientation de l'outil coupant*).

Dans ce cas, l'indicateur de solutions proposées est :

$$I_{SP} = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 0 \\ 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} + 1$$

6.4.2 Indicateur de solutions abandonnées

Cet indicateur montre le taux de solutions abandonnées parmi les solutions proposées entre deux revues projets.

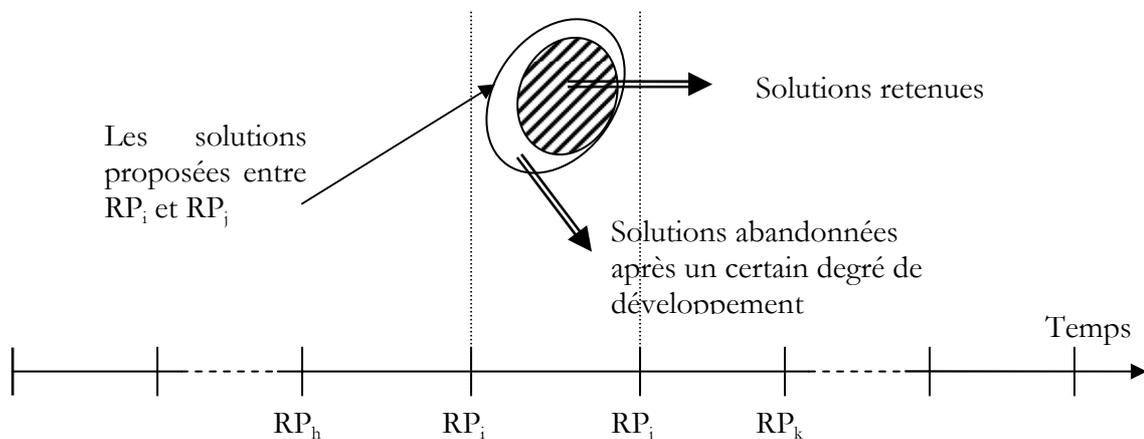


Figure 85- Les solutions abandonnées entre deux revues projets

Il peut être utilisé comme un indicateur absolu ou comme un indicateur relatif, en fonction de la classe de conception considérée.

$$Isol_{ab} = \frac{N_{Sab}}{N_{Sprop}} \cdot 100\%$$

Où :

$Isol_{ab}$: indicateur de solutions abandonnées.

N_{Sab} : le nombre de solutions abandonnées.

N_{Sprop} : le nombre de solutions proposées.

Dans un processus de conception avec un caractère routinier, nous pouvons avoir des informations sur le taux de solutions abandonnées dans différents moments de son déroulement, à cause de la nécessité de construire de nouvelles connaissances, voir la Figure 86.

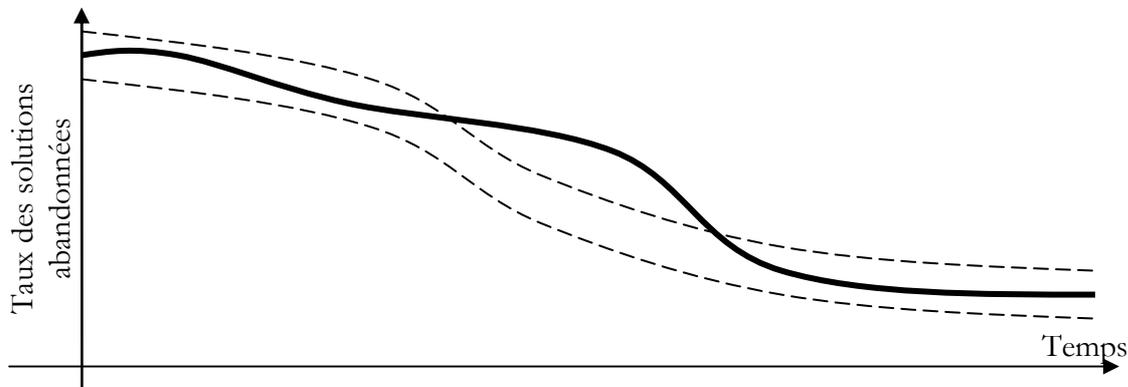


Figure 86- Evolution du taux des solutions abandonnées en temps

Le chef de projet peut comparer la valeur de cet indicateur pour différents projets de conception.

Entre les revues projet réalisées à 540 minutes et à 660 minutes, pour la deuxième expérience étudiée, nous avons constaté que les participants à la conception ont proposé 12 solutions et ils en ont abandonné 4.

Dans ce cas, l'indicateur de solutions abandonnées est le suivant :

$$Isol_{ab} = \frac{4}{12} \cdot 100\% = 33,3\%$$

6.4.3 Indicateurs d'itérations réalisées à cause de désaccords

Au cours du processus de conception, plusieurs points de vue différents de l'objet sont construits ou confrontés. Nous pouvons distinguer différentes vues en fonction de la manière d'abstraction qui est utilisée pour décrire les propriétés d'un produit :

- Spécifications initiales ;
- Description fonctionnelle ;
- Description structurelle ;
- Description comportementale ;
- Aspects physiques ;
- Description assemblage, etc.

Pendant le déroulement du processus de conception, chaque métier intervenant dans le processus de conception focalise son point de vue sur un niveau d'abstraction différent. Une recherche de compromis continue va ainsi caractériser le processus de conception.

Même avec une volonté d'aboutir à une solution des acteurs impliqués, il est souvent difficile de construire des compromis. Des négociations sont nécessaires et elles entraînent parfois la réitération de certaines tâches de conception.

Pour les chefs de projet, il est nécessaire de connaître, à l'occasion de chaque revue projet, quel est le taux du temps passé en itérations pour solutionner les désaccords et aussi, de savoir quel est l'impact de chaque type d'interaction, générant des désaccords, sur le temps de total de conception.

A partir de ces considérations, nous proposons les indicateurs suivants :

- Taux du temps passé en itérations, entre deux revues projets, pour solutionner les désaccords.
- L'impact de chaque type d'interaction génératrice de conflits sur le temps (mesuré entre deux revues projet).

6.4.3.1 Taux du temps passé en itérations pour solutionner les désaccords

$$Ti_dés = \frac{\sum_{i=1}^n Titér_dés_i}{T_{RP}} \cdot 100\%$$

Où :

i : c'est une variable ;

n : nombre total des types d'interactions ;

$Titér_dés_i$: le temps passé en itérations à cause de l'intervention de type « i » ;

T_{RP} : est l'intervalle du temps compris entre deux revues projet consécutives ;

$Ti_dés$: est le taux du temps passé en itérations, entre deux revues projets, pour solutionner les désaccords.

Pour le pilotage d'un processus de conception avec un caractère routinier, nous pouvons avoir des données, déjà enregistrées sur d'autres processus similaires, concernant les limites de variation de ce taux d'itérations pendant l'évolution du processus.

Cet indicateur peut être utilisé par le chef de projet pour connaître le degré de perturbation du déroulement du processus étudié à cause des désaccords.

Entre les revues projet réalisées à 540 minutes et à 660 minutes, pour la deuxième expérience étudiée, les participants à la conception ont réalisé une itération pour solutionner les désaccords liés au problème de la forme des éléments d'orientation pour l'outil coupant, entre 625 et 636 minutes.

La valeur de l'indicateur du taux du temps passé en itérations, entre deux revues projets, pour solutionner les désaccords est :

$$Ti_dés = \frac{11}{120} \cdot 100\% = 9\%$$

6.4.3.2 L'impact de chaque type d'interaction génératrice de conflits

Les interactions entre les participants à la conception du produit produisent souvent des conflits à cause des points de vue différents sur le produit. En fonction de la fréquence des interventions génératrices d'itérations pour résoudre les conflits, et aussi en fonction du temps passé pour réaliser ces itérations, nous avons proposé une matrice d'impact des interactions sur la durée du processus de conception (Figure 87).

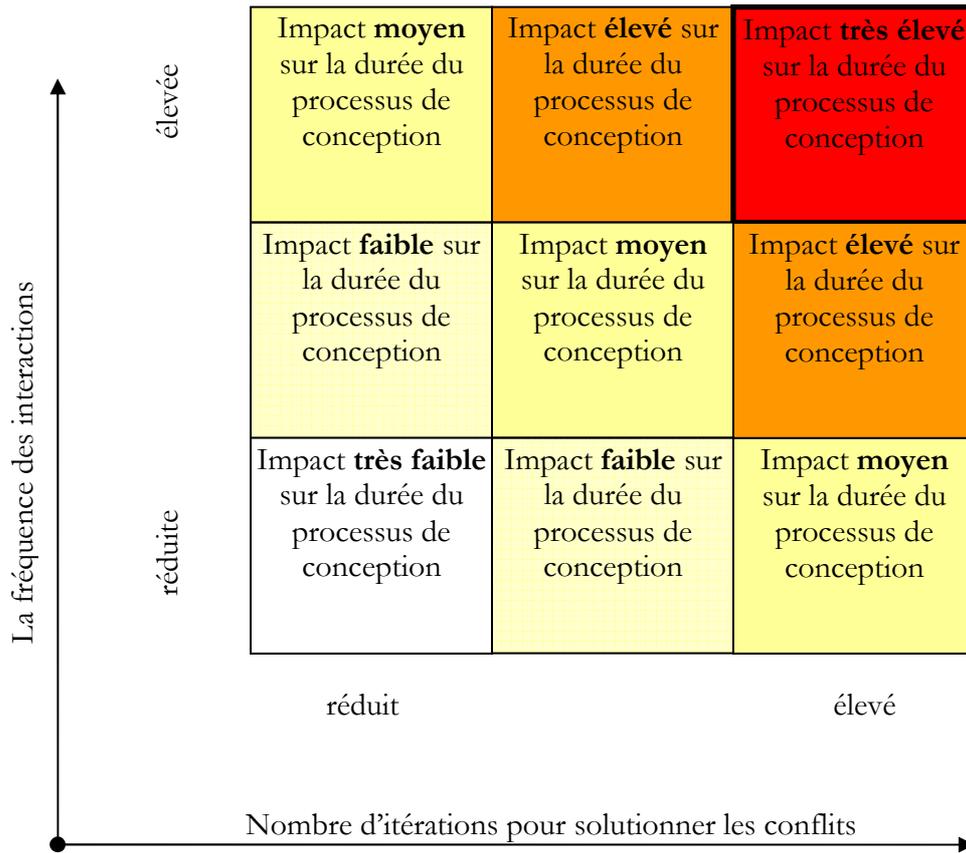


Figure 87- La matrice d'impact des interactions sur la durée du processus de conception

Dans ce cas, l'indicateur proposé a l'expression suivante :

$$I_{\text{int}} = \{I_1, \dots, I_n\},$$

$$I_i = \begin{pmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} \end{pmatrix},$$

Où :

I_i : est l'indicateur d'impact de l'interaction de type « i » sur le temps du processus ;

I_{int} : est l'indicateur général sous la forme d'un vecteur d'impact ;

En fonction du nombre d'éléments I_i et de leurs valeurs, le chef de projet peut avoir une vision sur la manière de négocier les conflits entre les participants et aussi il peut savoir quelles sont les interactions les plus sensibles pour essayer de les améliorer dans la phase prochaine.

Il est préférable d'avoir un nombre réduit d'éléments du vecteur I_{int} , et en plus, d'avoir dans les matrices d'impact des éléments situés au-dessous de la diagonale principale.

Pour la deuxième expérience étudiée, entre les revues projet réalisées à 540 minutes et à 660 minutes, les participants à la conception ont réalisé une seule itération pour solutionner les conflits. Pour réaliser cette itération a été réalisée une seule intervention, de type « f ». Dans ce cas, la valeur de l'indicateur l'impact de chaque type d'interaction génératrice de conflits sur le temps est :

$$I_{\text{int}} = \{I_i\} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

6.4.4 Indicateur type d'interaction – type d'objets intermédiaires – dialogues

Cet indicateur montre le taux d'objets intermédiaires du type esquisses et dessins et du type texte, ainsi que le taux des dialogues produits comme résultat de chaque type d'interaction entre les participants à la conception, entre deux revues de projet.

A l'aide de cet indicateur, nous pouvons connaître les types d'interactions qui facilitent les dialogues et/ou la production des objets intermédiaires. Aussi, nous pouvons identifier les types d'interactions qui ne génèrent pas un nombre significatif d'objets intermédiaires ou des dialogues ou, à la limite, les types d'interactions inexistantes. Dans le dernier cas, le chef de projet doit s'intéresser à la cause pour laquelle ces types d'interactions n'ont pas été observés.

Ainsi, le chef de projet a une vision sur les objets intermédiaires et sur les dialogues produits comme résultats de chaque type d'interactions.

Dans l'exemple montré dans le Tableau 12, portant sur la deuxième expérience étudiée, entre les revues projet réalisées à 540 minutes et à 660 minutes, nous pouvons constater que les interactions de type : **b ; c ; h ; j ; k ; l ; m**, sont inexistantes.

Type d'interaction	Participants (Acteurs)	Les objets intermédiaires		Dialogues
		esquisses et dessins	texte	
a	D → C; EM	12%	21%	39%
b	D → EM; C	0%	0%	0%
c	EM → D; C	0%	0%	0%
d	C → D; EM	63%	47%	28%
e	C → D	6%	13%	5%
f	D → C	3%	5%	15%
g	D → EM	2%	9%	6%
h	EM → D	0%	0%	0%
i	C → EM	14%	5%	7%
j	EM → C	0%	0%	0%
k	D (D ₁ ; D ₂ ; ... D _n)	0%	0%	0%
l	C (C ₁ ; C ₂ ; ... C _n)	0%	0%	0%
m	EM (EM ₁ ; EM ₂ ; ... EM _n)	0%	0%	0%

Tableau 12- Type d'interaction entre les participants – type d'objets intermédiaires réalisés – dialogues

Aussi les interactions de type : **e ; f ; g ; i**, ont un apport faible dans le déroulement du processus de conception.

D'une grande importance sont les interactions de type **a** et **d**. Ces interactions sont caractérisées par l'implication de toutes les catégories de participants, mais aussi par deux types de hiérarchie des dialogues : **D → C ; EM** et **C → D ; EM**, qui conduisent aux conclusions suivantes :

- la majorité des objets intermédiaires sont produits à cause des solutions proposées par C à D et EM,
- la majorité des dialogues est déclenchée par l'intervention de D quand celui-ci fait une demande ou une proposition à C et à son tour, C fait appel à EM pour effectuer un diagnostic ou pour valider ou invalider les choix déjà avancés, par son statut d'expert,
- un aspect important pour l'expérience étudiée est que EM n'a jamais déclenché des dialogues dans lesquels il a été impliqué. Dans toutes les situations, quand il intervient, il répond seulement aux sollicitations des autres participants à la conception. Ici il a un rôle de consultant.

6.4.5 Les OIs parent produits par chaque participant entre deux revues projet

C'est un indicateur quantitatif qui montre le pourcentage d'OIs produits par chaque participant, entre deux revues projet consécutives.

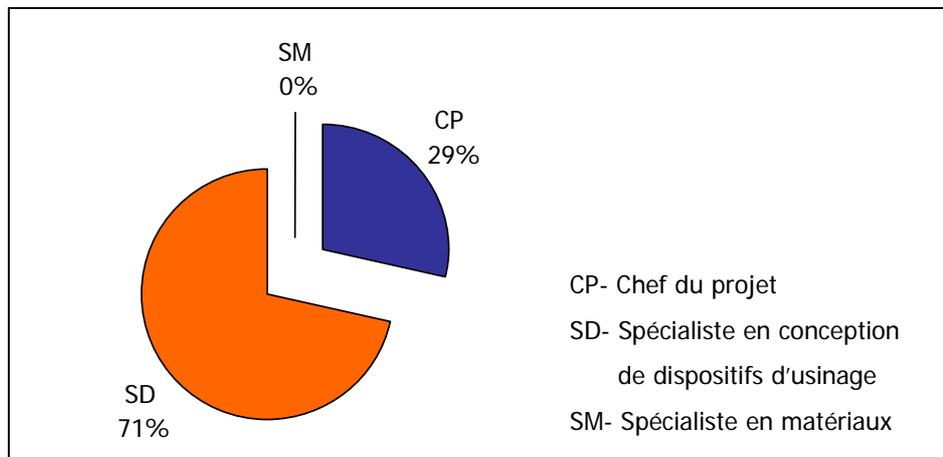


Figure 88- Les OIs parent produits

Cet indicateur donne des informations locales sur les sources d'émergence des Objets Intermédiaires parent. Il est utile au chef de projet dans la gestion du flux d'informations nécessaires pour la construction de connaissances.

Pour la deuxième expérience étudiée, de 540mn à 660mn, la représentation graphique de cet indicateur est montrée sur la Figure 88.

6.4.6 Taux d'itérations réalisées par chaque acteur

C'est un indicateur quantitatif qui montre le pourcentage d'itérations réalisées par chaque acteur, entre deux revues projet.

$$Tit\acute{e}r_acteur_x = \frac{\sum_{i=1}^n Nit\acute{e}r_acteur_x_i}{\sum_{i=1}^n Nit\acute{e}r_i} \cdot 100\% \quad (2)$$

Où :

i : la variable ;

n : est le nombre total de tâches de conception ;

Niter_acteur_x_i : est le nombre d'itérations réalisées par l'acteur « x » pour la tâche « i », entre deux revues projet.

Tit\acute{e}r_acteur_x : est le taux d'itérations réalisées par l'acteur « x », entre deux revues projet.

Nit\acute{e}r_i : est le nombre d'itérations pour la tâche « i » réalisées entre deux revues projet.

Pour la deuxième expérience étudiée, entre 540 minutes et 660 minutes, nous avons :

$$Tit\acute{e}r_acteur_{CP} = \frac{0+0+0+0+0+0+1+1+0+0+1+0+0+0}{0+0+0+0+0+0+2+2+0+0+3+0+0+0} \cdot 100\% = \frac{3}{7} = 42\%$$

$$Tit\acute{e}r_acteur_{SD} = \frac{0+0+0+0+0+0+1+1+0+0+1+0+0+0}{0+0+0+0+0+0+2+2+0+0+3+0+0+0} \cdot 100\% = \frac{3}{7} = 42\%$$

$$Tit\acute{e}r_acteur_{SM} = 6\%$$

6.4.7 Type d'interaction/nombre d'itérations

Cet indicateur quantitatif montre le nombre et le type d'itérations pour chaque type d'interaction, entre deux revues projet consécutives. Il est utile au chef de projet dans le pilotage du processus de conception. Pour la deuxième expérience étudiée, de 540mn à 660mn, la valeur de cet indicateur est montrée sur la Figure 89.

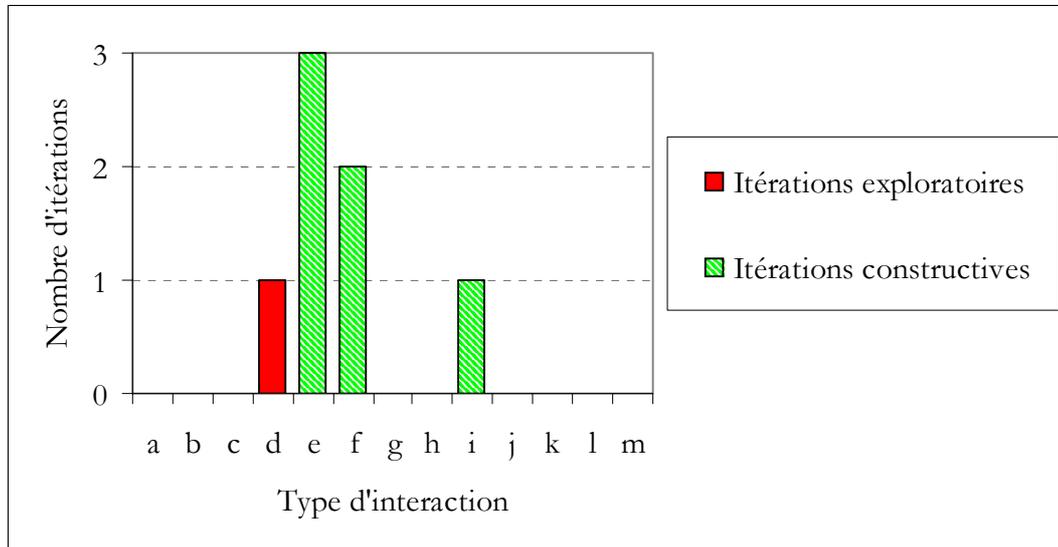


Figure 89- Nombre d'itérations par type d'interaction

6.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons proposé une démarche de construction d'indicateurs de performance du processus de conception. Deux types d'indicateurs y sont présentés : les indicateurs de résultat et les indicateurs de processus. Ces indicateurs sont développés sur la base de l'analyse des itérations développée dans cette thèse.

Il est clair que ces indicateurs ne sont pas destinés à être utilisés tous et en même temps. Le choix d'un indicateur se fera en fonction de la personne qui l'utilisera et des données disponibles pour le mettre en œuvre.

Les résultats obtenus sur les expériences de conception étudiées ne doivent pas être généralisés. Ils sont donnés pour indiquer la possibilité de construction des indicateurs proposés et leur difficulté de mise en œuvre.

Nous résumons, dans le Tableau 13 et le Tableau 14, les différents indicateurs proposés dans notre travail. Nous donnons, pour chacun d'eux, l'objectif poursuivi, la difficulté de mise en œuvre et l'utilité.

INDICATEUR DE RESULTAT	SENS	DIFFICULTE DE MISE EN OEUVRE	UTILITE
Indicateur d'itérations	Montrer qualitativement le poids des itérations dans un processus de conception étudié.	facile	Evaluer l'efficacité du processus de conception
Indicateur de changement d'objectifs	Montrer le taux de temps passé en itérations à cause des changements d'objectifs, interdépendances entre les activités et à cause d'erreurs de conception	facile/moyenne	Déterminer les influences de chaque source d'itérations sur la durée totale du processus.
Indicateur d'interdépendance des activités			
Indicateur d'erreurs de conception			
Indicateur d'intentionnalité	Montrer le poids de volonté de réaliser les itérations.	moyenne	Donner au chef de projet une vision d'ensemble sur le taux du temps passé sur les itérations volontaire. Pour un processus routinier de conception le chef de projet peut comparer la valeur de cet indicateur avec les valeurs constatées sur d'autres processus pour évaluer sa performance.
Indicateur d'apport (+/-)	montrer quantitativement le poids d'apport positif des itérations dans le processus de conception	moyenne	Evaluer l'apport positif des itérations sur la durée totale du processus de conception
Indicateur d'étape	montrer les pourcentages de temps passé en itérations pour chaque étape de conception.	moyenne	Permettre de réaliser des prescriptions pour les processus routiniers de conception
Indicateur typologie – sources	montrer les dépendances entre les types et les sources d'itérations afin de définir les interventions nécessaires.	moyenne	Permettre de réaliser des prescriptions pour les processus routiniers de conception
Indicateur sources – typologie			
Indicateur typologie – typologie			

Tableau 13- Les indicateurs de résultat proposés

INDICATEUR DE PROCESSUS	SENS	DIFFICULTE DE MISE EN OEUVRE	UTILITE
Indicateur de l'influence des solutions proposées	donner des informations concernant le risque d'avoir des itérations dans le processus de conception, introduites par les solutions proposées à un moment donné, entre deux revues projet.	moyenne	Permettre au chef de projet de savoir quand faut-il relancer le processus ou faire appel à la sous-traitance.
Indicateur de solutions abandonnées	montrer le taux de solutions abandonnées parmi les solutions proposées entre deux revues projets.	moyenne/difficile	Permettre au chef de projet de comparer le processus en cours avec d'autres processus.
Taux du temps passé en itérations, entre deux revues projets, pour cause de désaccords	Montrer la perte du temps à cause de ce types d'itérations	moyenne/difficile	Permettre au chef de projet de connaître le degré de perturbation du déroulement du processus étudié à cause des désaccords, afin d'intervenir.
L'impact de chaque type d'interaction génératrice de conflits sur le temps (mesuré entre deux revues projet)	Pour connaître le type d'interactions qui introduisent le plus grand nombre d'itérations	difficile	Permettre au chef de projet de résoudre les conflits
Indicateur type d'interaction – type d'objets intermédiaires – dialogues	Pour connaître le type d'interactions qui facilitent les dialogues et/ou la production d'OIs	difficile	Permettre au chef de projet de mieux diriger l'équipe de conception
Les OIs parent produits par chaque participant entre deux revues projet	Connaître les sources des OIs parent	moyenne	Permettre au chef de projet de gérer les flux d'informations nécessaires à la construction des connaissances
Taux d'itérations réalisées par chaque acteur entre deux revues projet	Déterminer l'apport de chaque participant	moyenne	Permettre au chef de projet de piloter le processus et d'évaluer chaque membre de l'équipe de conception.
Type d'interaction/nombre d'itérations entre deux revues projet	Connaître le nombre d'itérations générées par chaque type d'interaction	moyenne/difficile	Permettre au chef de projet de piloter le processus.

Tableau 14- Les indicateurs de processus proposés

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire se placent dans le contexte général de l'évaluation et de l'amélioration des performances du processus de conception. Notre objectif était de développer une méthodologie de construction d'indicateurs d'évaluation des performances de la conception de produits. Notre travail est articulé autour de la notion d'itérations en conception.

La conception des produits est un processus dynamique et complexe. Les tâches nécessaires à sa réalisation sont souvent soumises à des perturbations fréquentes. Ces perturbations peuvent se présenter sous différentes formes : des aléas, des changements dans la mission d'une activité ou des remises en cause de mauvaises décisions techniques, des changements dans les stratégies de management. Les perturbations se traduisent, dans la conception, par des itérations. Celles-ci influencent directement les performances du processus de conception. Nous avons ainsi considéré les itérations comme base de développement des indicateurs de performance que nous avons présenté dans cette thèse.

Nous avons commencé notre travail par un état de l'art pour mettre en évidence les caractéristiques de l'activité et du processus de conception ainsi que les facteurs qui les influencent. Les principales caractéristiques abordées sont :

- Le type de problème de conception rencontré (créative, innovante, routinière). En fonction des problèmes de conception, les sources de connaissances et les stratégies de résolution de ces problèmes peuvent être connues ou non. A cause de ces aspects, le pilotage et le déroulement des activités de conception n'est pas la même pour les trois catégories de conception.
- Les modes de travail en conception (synchrone/asynchrone, à distance/en présentiel). En fonction de ces deux dimensions, le travail réalisé par le concepteur peut être soit privé, soit public. Dans ce cas, le flux d'information est très différent d'un cas à l'autre, avec des influences sur déroulement du processus de conception, surtout au niveau organisationnel.

Après l'analyse que nous avons faite sur plusieurs modèles existants pour la représentation du processus de conception, nous avons constaté que :

- sur l'ensemble des modèles analysés, descriptifs ou prescriptifs, le processus de conception n'est pas un processus linéaire descendant. Les modèles indiquent des nombreuses interactions, feedbacks, entre phases et entre étapes intermédiaires du processus ;
- sur certains modèles, la modélisation de la conception est abordée comme itération d'un cycle élémentaire de conception [ROOZ 95] ou comme une interaction entre plusieurs modules, chacun de ces modules possédant son objectif local [GARR 95].

Les caractéristiques de la conception font que l'évaluation de sa performance n'est pas une tâche évidente. Elle est beaucoup plus compliquée que dans l'évaluation des processus de production par exemple. A partir de ce constat, nous avons proposé d'aborder la problématique suivante dans ce travail : « Comment pouvons-nous évaluer les performances du Processus de Conception dans le contexte de l'Ingénierie Simultanée ? ». Nous considérons que les itérations sont l'une des caractéristiques du processus de conception qui influence le plus fortement sa performance. L'analyse des itérations est ainsi nécessaire pour la conduite de notre travail.

Pour traiter la problématique posée, nos recherches ont été focalisées sur l'analyse du processus de conception. Cela nous a procuré une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition des itérations et de quantifier leur impact sur le déroulement du processus de conception. L'objectif final

a été la proposition d'indicateurs pour évaluer les performances du processus de conception, en utilisant les itérations comme base de construction de ces indicateurs Figure 90.

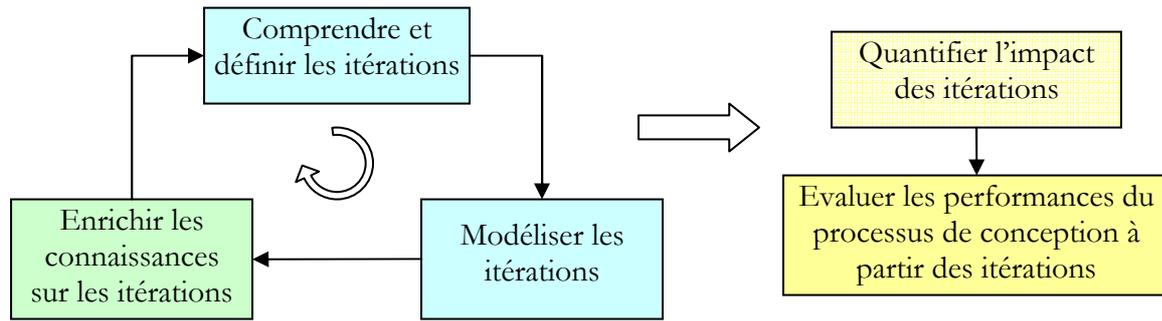


Figure 90- Démarche de recherche adoptée

La **première contribution** de cette thèse consiste en un travail théorique sur les itérations dans le processus de conception. Nous avons d'abord défini la notion d'itération en conception, puis nous avons réalisé une analyse qualitative des itérations dans le processus de conception.

Après une étude bibliographique sur la modélisation du processus de conception, notamment dans le contexte d'ingénierie simultanée, et sur la modélisation des flux d'informations en conception, nous avons proposé une typologie des itérations et nous avons aussi identifié les sources génératrices des itérations.

Cette typologie permet de choisir les méthodes adéquates de traitement des itérations afin de les éliminer ou de les réduire. Ainsi, nous avons choisi comme modèle de représentation des tâches du processus de conception le modèle DSM. Ce modèle décrit l'enchaînement des tâches d'un projet de conception et les relations entre celles-ci. Dans ce cas, l'algorithme de diagonalisation de la matrice DSM peut être utilisé pour réorganiser la matrice des tâches de conception, afin de réduire les itérations. Cette démarche est très efficace dans le cas de la conception routinière.

La **deuxième contribution** réside dans un travail empirique réalisé sur des expériences de conception pour enrichir les connaissances sur les itérations et pour quantifier leur impact sur les performances du processus de conception. Trois expériences de conception ont été observées et analysées.

Les analyses réalisées sur ces expériences de conception nous ont permis de :

- valider les hypothèses faites concernant la typologie et les sources des itérations proposées ;
- identifier des cycles séparables des Objets Intermédiaires. Ces résultats permettent aux chefs de projet d'intervenir pour réorienter les actions des participants, afin de relancer le processus de conception et éviter de longues itérations ;
- identifier les type d'interactions entre les participants à la conception, susceptibles d'introduire des itérations ;
- réaliser un synoptique du processus de conception nécessaire à l'identification et à l'analyse des itérations ;
- mettre en évidence les mécanismes d'apparition des itérations dans le processus de conception ;
- proposer des méthodes pour l'identification des itérations à partir des observations et à partir des représentations du processus de conception (les corpus, représentation des actes de conception, DSM, GANTT, etc.).

La **troisième contribution** réside dans une approche d'évaluation des performances du processus de conception à partir des itérations.

Dans ce mémoire, nous avons présenté des aspects liés à l'évaluation des performances du processus de conception, en partant des objectifs de l'évaluation vers les outils employés. Ensuite, nous avons construit des indicateurs de performances du processus de conception. Les indicateurs proposés sont de deux types : indicateurs de processus et indicateurs de résultat. Ces indicateurs ne sont pas tous destinés à être utilisés par une même entité (concepteur, chef de projet, équipe, ...). En effet, en fonction des données dont on peut disposer, du type d'évaluation désiré (a posteriori ou a priori), et du coût qu'on peut consacrer à la construction puis l'utilisation de ces indicateurs, on fera les choix adéquats.

PERSPECTIVES

Les perspectives de cette thèse sont de deux catégories : des perspectives à court terme et des perspectives à long terme.

A court terme, la mise en place d'expériences simples de conception peut nous aider à mieux lier l'aspect théorique avec l'aspect empirique de l'analyse des itérations. Ceci permettra une meilleure quantification de leurs impacts sur les performances de la conception. Notre démarche de construction d'indicateurs de performance est assez lourde. Il serait intéressant de mettre au point une ou plusieurs méthodes simples par lesquelles on peut identifier, rapidement et facilement, les itérations pendant le déroulement du processus de conception ainsi que les éléments servant à leur quantification.

A long terme, ce travail peut donner lieu au développement d'un outil informatique utile aux chefs de projet pour pouvoir mieux piloter le processus de conception. Cet outil doit être développé à partir des indicateurs de performance proposés. Il doit offrir aux chefs de projet une vision claire sur l'état du processus de conception en indiquant les tendances d'évolution des paramètres du processus de conception. Il doit aussi être capable de proposer une série de prescriptions pour améliorer les performances du processus de conception. Un exemple d'une maquette graphique d'un tel outil est montré sur la Figure 91.

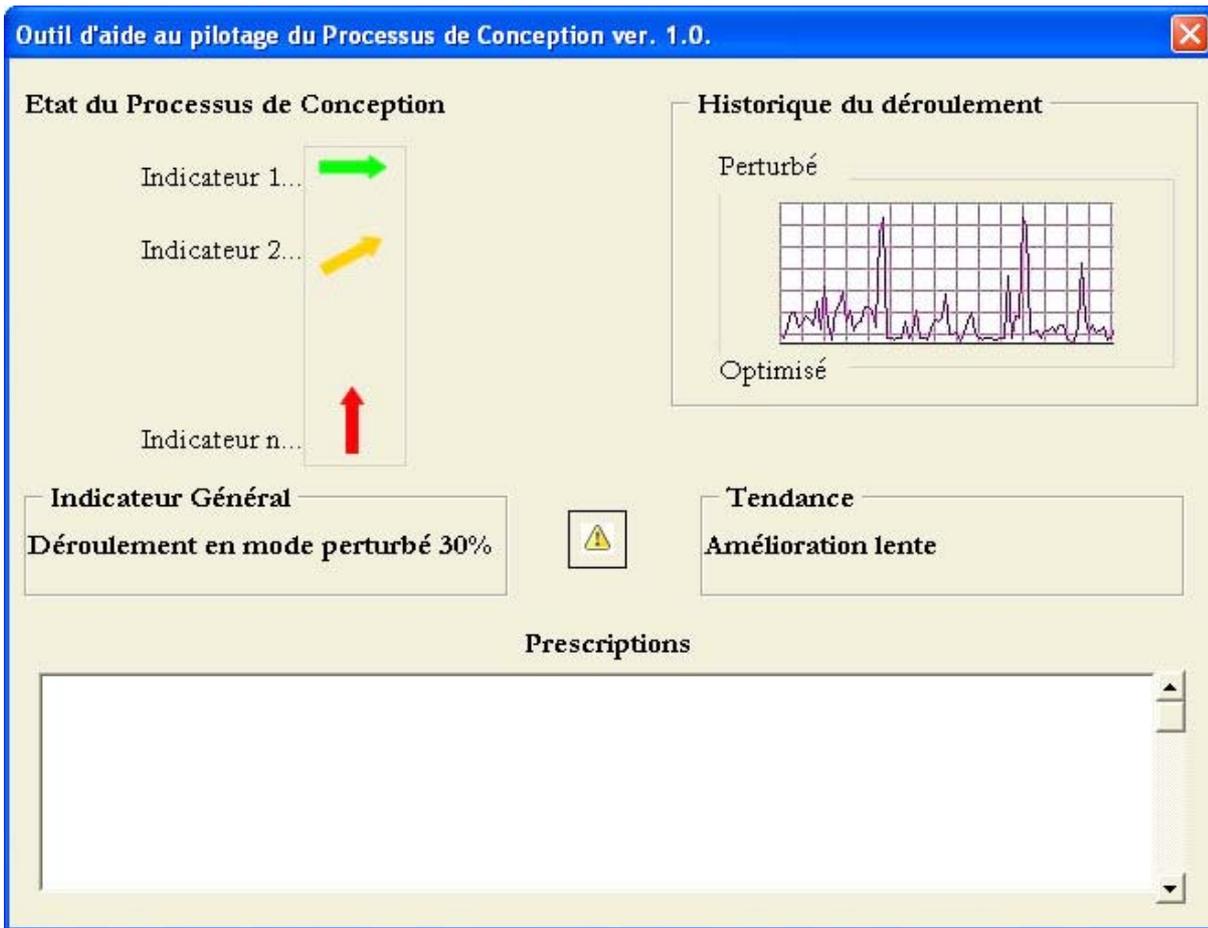


Figure 91- La maquette graphique de l'outil d'aide au pilotage du processus de conception

BIBLIOGRAPHIE

- [ACNO 96] **“Intégration des Activités Non Structurées dans la modélisation des systèmes de production”**, Action incitative du D.S.P.T.8 en productique, rapport final, ACNOS, 1996.
- [ADAM 00] R.S. Adams, C.J. Atman, **“Characterizing Engineering Student Design Processes – An Illustration of Iteration”**, Proceedings of the ASEE Annual Conference, Session 2330, juin 18-21, St. Louis, MO, 2000.
- [ADAM 99] R.S. Adams, C.J. Atman, **“Cognitive Processes in Iterative Design Behavior”**, Proceedings of the 29th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Session 11a6, San Juan, Puerto Rico, novembre 10-13, 1999.
- [AFNO 88] **“Recommandation pour obtenir et assurer la qualité en conception”**, Ref. X50-127, AFNOR, 1988.
- [AFNO 92] **“Gérer la qualité; concepts et terminologie”**, tome 1, AFNOR, 1992.
- [AFNO 04] **“Management de projet”** Saint-Denis La Plaine, ISBN 2-12-215331-8, AFNOR, 2004.
- [AHME 01] S. Ahmed, **“Understanding the use and reuse of experience in engineering design”**, Thèse de doctorat, Cambridge University Engineering Department, 2001.
- [AITS 95] F. Aitsahlia, E. Johnson, P. Will, **“Is concurrent engineering always a sensible proposition?”**, IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 42, no. 2, pages 166-170, 1995.
- [ANGH 02] D.C. Anghel, T. Boudouh, O. Garro, I. Ungureanu, **“Analyse des itérations dans le processus de conception”**, Conferința internațională de Inginerie Integrată C2I 2002, Timișoara, România, 2002.
- [ANGH 03] D.C. Anghel, T. Boudouh, O. Garro, I. Ungureanu, **“Etude expérimentale des itérations dans le processus de conception”**, 8^e Colloque AIP-PRIMECA, la Plagne, France, 31 mars, 1^{er} et 2 avril, 2003.
- [ANGH 04a] D.C. Anghel, **“L’influence des itérations dans le cadre du processus de conception”**, Construcția de mașini, nr.4, Roumanie, 2004.
- [ANGH 04b] D.C. Anghel, T. Boudouh, O. Garro, I. Ungureanu, **“Minimizing iteration impacts in the design process”**, 10th International Conference on Concurrent Enterprising, Escuela Superior de Ingenieros, Seville, Spain, 14-16 juin, 2004.
- [ANGH 05a] D.C. Anghel, N. Belu, **„Optimisation de la conception par l’amélioration d’interactions entre les participantes, dans le cas d’une équipe multidisciplinaire”**, Conferința științifică internațională Tehnologii Moderne,

Calitate, Restructurare, TMCR, 2005 Chişinău, vol 5a, 19 – 22 mai, 2005

- [ANGH 05b] D.C. Anghel, T. Boudouh, O. Garro, I. Ungureanu, “**Contributions à l'analyse des itérations dans le processus de conception**”, 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, 2005.
- [ANGH 05c] D.C. Anghel, N. Belu, „**The interactions between designers, in the concurrent engineering context**”, International Conference on Integrated Engineering C2I 2005, Timisoara-Romania, 2005.
- [ARCH 84] L.B. Archer, “**Systematic Method for Designers**”, In: N. Cross (ed.), Developments in Design Methodology, Wiley, Chichester, 1984.
- [ARCH 99] L.B. Archer, “**Design, innovation, agility**”, Design Studies, vol. 20, no. 6, novembre, 1999.
- [AUST 70] J.L. Austin. “**Quand dire, c'est faire**”, Éditions du Seuil, France, 1970.
- [BADK 99] P. Badke-Schaub, E. Frankenberger, “**Analysis of design projects**”, Design Studies, vol. 20, Issue 5, pages 465-480, septembre, 1999.
- [BALL 00] G. Ballard, “**Positive Vs Negative Iteration In Design**”, Proceedings Eighth Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-6, Brighton, UK, juillet 17-19, 2000.
- [BELH 96] U. Belhe, A. Kusiak, “**Modelling relationships among design activities**”, Journal of Mechanical Design, vol. 118, no. 4, pages 454-460, 1996.
- [BLAN 92] E. Blanco, “**L'émergence du produit dans la conception distribuée**”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [BLES 01] L.T.M. Blessing, A. Chakrabarti, “**How to design research: a design research methodology**”, Springer Verlag, London Ltd, 2001.
- [BONN 01] C. Bonnefous, A. Courtois, “**Indicateurs de performances**”, Hermès, Paris, France, 2001.
- [BOUD 00] T. Boudouh, “**Modélisation et évaluation d'organisations industrielles en ingénierie. Approche méthodologique pour la mise en œuvre de solutions de conception intégrée**”, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 19 janvier, 2000.
- [BOUD 02] T. Boudouh, D. Noyes, “**Cycle de développement de produit : analyse des performances en environnement perturbé**”, International Journal of Mechanical Production Systems Engineering, no. 6, pages 15-23, décembre, 2002.
- [BOUD 04a] T. Boudouh, D.C. Anghel, O. Garro, “**An experimental study of iterations in the design process**”, 5th Int. Conf. Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'2004), Bath, UK, 5 -7 avril, 2004.
- [BOUD 04b] T. Boudouh, D.C. Anghel, O. Garro, “**Design Iteration In A Geographically**

- Distributed Design Process**”, 14th CIRP Design Seminar 2004 Cairo Egypt, 16-18 mai, 2004.
- [BOUD 06] T. Boudouh, D.C. Anghel, O. Garro, “**Design iterations in a geographically distributed design process**”, in *Advances in Design*, Edited by H. ElMaraghy and W. ElMaraghy, Springer Verlag, pages 377-386, janvier, 2006.
- [BOUD 99] T. Boudouh, D. Noyes, M. Aldanondo, “**Methode d’analyse structurée en ingénierie simultanée**”, 3^e Congrès international de génie industriel, Montréal, Québec, 25-28 mai, 1999.
- [BOUJ 00] J.F. Boujut, E. Blanco, “**Intermediary objects as a means to foster cooperation in engineering design**”, Int. Workshop on the role of objects in design cooperation, COOP’2000, Sophia Antipolis, mai, 2000.
- [BOUR 94] P. Bourdichon “**L’ingénierie simultanée et la gestion d’informations**”, Hermès, Paris, 1994.
- [BROW 01] T.R. Browning, “**Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions**”, IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 48, no. 3, august, 2001.
- [BROW 85] D. C. Brown, B. Chandrasekaran, “**Expert systems for a class of mechanical design activity**”, in J. S. Gero (ed.), *Knowledge Engineering in Computer-Aided Design*, North-Holland, Amsterdam, 1985.
- [BROW 98] T.R. Browning, “**Use of Dependency Structure Matrices for Product Development Cycle Time Reduction**”, Proceedings of the Fifth ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Tokyo, Japan, 15-17 juin, 1998.
- [BUCC 88] L. Bucciarelli, “**An ethnographic perspective on engineering design**”, *Design Studies*, vol. 9, no.3, pages 159-168, 1988.
- [BUCC 94] L. Bucciarelli, “**Designing Engineers**”, MIT Press, Cambridge, MA, 1994.
- [BURE 92] “**Indicateurs Dg Conseil/Bureaux d’Etudes 37% des bureaux d’études soumis a des norms**”, *Bureaux d’Etudes* no. 76, pag.18, 1992.
- [BUSB 01] J.S. Busby, “**Error and distributed cognition in design**”, *Design Studies*, vol. 22, Issue 3, pages 233-254, mai, 2001.
- [CAO 92] X.B. Cao, “**Contribution à l’élaboration de systèmes d’aides à la conception à base de connaissances ayant des facultés d’apprentissage. Application à la confection**”, Thèse de doctorat en Automatique, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, septembre, 1992.
- [CARR 98] M. Carrascosa, S.D. Eppinger, D.E. Whitney, “**Using the design structure matrix to estimate product development time**”, Proceedings of DETC’98, ASME Design Engineering Technical Conferences, Atlanta, Georgia, USA, septembre 13-16, 1998.

- [CARR 99] M. Carrascosa, "**Product Development Timing and Cost Analysis Using Information Flow Modeling**", Thèse de doctorat, MIT, 1999.
- [CART 92] D.E. Carter, B.S. Baker, "**Concurrent Engineering: The Product Development Environment for the 1990s**", Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [CAVA 99] D. Cavallucci, "**Contribution à la conception de nouveaux systèmes mécaniques par intégration méthodologique**", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 1999.
- [CATT 04] M. Cattan, "**Maîtriser le processus de conception**", AFNOR, 2004.
- [CERE 01] C. Cerezuela, S. Limam, D. Riopel, "**Processus de développement de produit et ingénierie concurrente**", APII-JESA, vol. 35, no. 6, pages 699 à 726, 2001.
- [CETI 95] "**Productivité en conception**", Brochure du Centre Technique des Industries Mécaniques, CETIM, 1995.
- [CHRI 95] A.D. Christian, W.P. Seering, "**A Model of Information Exchange in the Design Process**", Design Engineering Technical Conference DE, vol. 83, 1995.
- [CHOU 04] D. Choulier, "**Formalisation de la démarche de recherche CID**", Rapport interne CID, mars, 2004.
- [CLAR 87] K.B. Clark, B. Chew, T. Fujimoto, "**Product Development in the World Auto Industry: Strategy, Organization and Performance**", Graduate School of Business Administration, Harvard University, 1987.
- [CLAR 91] K. Clark, T. Fujimoto, "**Product Development Performance: Strategy, Organisation And Management in the World Auto Industry**", Harvard Business School Press, Massachusetts, USA, 1991.
- [COOK 02] J. Cooke, C. McMahon, R. North, "**Sources of error in the design process**", IDMME, Clermont-Ferrand, France, mai 14-16, 2002.
- [COST 03] R. Costa, K. Durward, I. Sobek, "**Iteration in Engineering Design: Inherent and Unavoidable or Product of Choices Made?**", Proceedings of DETC'03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Chicago, Illinois USA, septembre 2-6, 2003.
- [CROS 97] N. Cross, "**Descriptive models of creative design: application to an example**", Design Studies, vol. 18, Issue 4, pages 427-435, 1997.
- [DOME 95] M. Domenc, J.M. Durieux, J. Monot, "**Contribution de l'homme dans la maîtrise d'un processus; exemple du processus de gestion de production dans une PME**", Actes du séminaire: L'Homme, l'Organisation et la Qualité, LERASS, Toulouse, France, 1995.

- [DONG 92] Q. Dong, “**Representing information flow and knowledge management in product design using the design structure matrix**”, Thèse de Master, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [DRAG 99] G. Draghici, “**Ingineria integrată a produselor**”, Editura Eurobit, Timișoara, 1999.
- [DURA 94] C. Durand, “**La coopération technologique internationale. Les transferts de technologie**”, De Boeck-Wesmael S.A. Bruxelles, 1994.
- [ECOS 93] “**Pilotage stratégique de la firme et gestion des projets: de Ford et Taylor à AGILE et IMS**”, in Projets et entreprises, Economica, ECOSIP (Economie des systemes intégrés de production), pages 178-212, 1993.
- [EHRL 99] K. Ehrlenspiel, “**Practicians – How they are designing?...and why?**”, International conference on engineering design, ICED 99, Munich, août 24-26, 1999.
- [EPPI 94] S.D. Eppinger, D.E. Whitney, R.P. Smith, D.A. Gebala, “**A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development**”, Research in Engineering Design , vol. 6, no. 1, pages 1-13, 1994.
- [FING 89] S. Finger, J.R. Dixon, “**A review of research in mechanical engineering design. Part I: descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes**”, Research in Engineering Design, vol. 1, pages 51-67, 1989.
- [FOUL 94] C. Foulard, “**La modélisation en entreprise**”, CIM-OSA et ingénierie simultanée, Edition Hermès, 1994.
- [FRAN 96] C. Frankfort-Nachmias, D. Nachmias, “**Research methods in the social sciences**”, London: Arnold, 1996.
- [FREN 85] M.J. French, “**Conceptual Design for Engineers**”, Second ed., ed T. D. Council, Bath: The Pitman-Press, 1985.
- [GARO 95] O. Garro, I. Salau, P. Martin, “**Distributed Design Theory and Methodology**”, Int. J. of Concurrent Engineering: Research and Application (CERA) 3(3), pages 43-54, 1995.
- [GARR 00] O. Garro, “**Problématique de la Conception distribuée**”, Rapport interne CID no. 03/2000, 2000.
- [GARR 01] O. Garro, D. Choulier, S. Deniaud, “**Les actes de conception : Un modèle pour des outils d'aide à la conception distribuée**”, 10^{ème} Atelier Le Travail Humain, modéliser les activités collectives de conception, Paris, pages 167-182, 27-28 juin, 2001.
- [GARR 02] O. Garro, “**Nouveaux modes de coopération et d'innovation en conception**”, Conferința internațională de Inginerie Integrată C2I 2002, Timișoara, România, 25-26 avril, 2002.

- [GERO 90] J.S. Gero, “**Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design**”, AI Magazine, vol. 11, no. 4, pages 26-36, 1990.
- [GRAC 02] “**Une expérience de conception collaborative à distance ; A distant collaborative design experiment Mécanique et Industries**”, Groupe GRACC, F. Bennis, E. Blanco, J.F. Boujut, P. Charpentier, A. Degrave, S. Deniaud, O. Garro, F.O. Martin, J.P. Micaelli, J.F. Petiot et G. Ris, vol. 3, pages 153-161, 2002.
- [GREN 03] C. Grenier, “**Rôle de l'Objet Intermédiaire pour mieux comprendre la structuration d'un réseau organisationnel et technologique d'acteurs - cas d'un réseau de soin**”, Communication à la 8ème Conférence de l'Association Information Management, Grenoble, mai, 2003.
- [HA 95] A. Ha, E. Porteus, “**Optimal Timing of Reviews in the Concurrent Design for Manufacturability**”, Management Science, vol. 41, no.9, septembre, 1995.
- [HARR 91] H.J. Harrington, “**Business Process Improvement**”, The Breakthrough Strategy for Total Quality, Productivity, and Competitiveness, McGraw-Hill, 1991.
- [HERR 05] J.W. Herrmann, “**Controlling Iteration in Product Development Processes**”, Technical Report 2005-91, Institute for Systems Research, University of Maryland, College Park, 2005.
- [HARV 94] “**Ingénierie Simultanée : l'exemple Américain**”, HARVEST – La dimension CFAO, no. 22, avril – mai, 1994.
- [HU 00] X. Hu, J. Pang, Y. Pang, M. Atwood, W. Sun, W.C. Regli, “**A survey on design rationale: representation, capture and retrieval**”, ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC2000/DFM-14008, Baltimore, Maryland, septembre 10-13, 2000.
- [HUCK 95] T. Huckvale, M. Ould, “**Process modelling-Who, What and How : Role Activity Diagramming**”, Business process change, Reengineering Concepts, Methods and Technologies, ed. By V. Grover and W.J. Kettinger, Idea Group Publishing, pages 330-349, 1995.
- [IDEL 02] Z. Idelmerfaa., J. Richard, “**Principes et critères pour l'organisation d'activités coopératives de conception**”, Le Travail Humain, 65 (4), pages 364-385, Vendôme, France, 2002.
- [ISAK 00] O. Isaksson, S. Keski-Seppälä, S.D. Eppinger, “**Evaluation of design process alternatives using signal flow graphs**”, Journal of Engineering Design, vol. 11, no. 3, pages 211-224, 2000.
- [IWAT 94] K. Iwata, E. Arai, M. Onosato, R.K. Yabusaki, “**Conversion model and data management in human-centred concurrent engineering**”, 2nd, IFAC-IFIP-IFORS Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Vienna, Austria, juin 13-15, 1994.

- [JEAN 98] A. Jeantet, “**Les objets intermédiaires de la conception**”, Sociologie du travail, no 3, pages 291-316, 1998.
- [JOHA 93] H.J. Johansson, P. Mc Hugh, A.J. Pendlebury, W.A. Wheeler III, “**Business Process Reengineering**”, Breakpoint Strategies for Market Dominance, John Wiley & Sons Ltd, England, 1993.
- [JUN 02] H.B. Jun, H.W. Suh, “**Product development process modeling considering patterns of the design activity**”, Korea Advanced Inst. Sci. Technol. (KAIST), Daejeon, Korea, 2002.
- [KAMI 91] D. Kaminetzky, “**Design and Construction Failures: lessons From Forensic Investigations**”, McGraw Hill, New York, 1991.
- [KAUF 67] A. Kaufmann, “**Metode și modele ale cercetării operaționale**”, vol I, II, Editura Științifică, 1967.
- [KLEI 99] S. Kleinhans, “**Contribution à une méthode de formulation et de mise en oeuvre d’une stratégie industrielle**”, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1999.
- [KOTA 91] S. Kota, A.C. Ward, “**Functions, structures and constraints in conceptual design**”, Design laboratory, Dept of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Michigan, Ann Arbor, 1991.
- [KRIS 95] V. Krishnan, S.D. Eppinger, D.E. Whitney, “**Accelerating product development by the exchange of preliminary product design information**”, Journal of Mechanical Design, vol. 117, pages 491-498, 1995.
- [KRIS 97] V. Krishnan, S.D. Eppinger, D.E. Whitney, “**Model-Based Framework to Overlap Product Development Activities**”, Management Science vol. 43, no. 4, pages 437-451, 1997.
- [KRIS 98] V. Krishnan, “**Modeling ordered decision making in product development**”, European Journal of Operational Research, vol. 111, Issue 2, 1, pages 351-368, décembre, 1998.
- [KUSI 90] A. Kusiak, K. Park, “**Concurrent engineering: decomposition and scheduling of design activities**”, International Journal of Production Research, Vol. 28, No. 10, pages 1883-1900, 1990.
- [KUSI 93] A. Kusiak, J. Wang, “**Efficient organizing of design activities**”, International Journal of Production Research, vol. 31, no. 4, pages 753-769, 1993.
- [KUSI 94] A. Kusiak, N. Larson, J. Wang, “**Reengineering of Design and Manufacturing Processes**”, Computers and Industrial Engineering, 26(3), pages 521-536, 1994.
- [LARS 96a] N. Larson, A. Kusiak, “**Managing Design Processes: A Risk Assessment Approach**”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A, vol. 26, no. 6, pages 749-759, 1996.

- [LARS 96b] N. Larson, A. Kusiak, “**System Reliability Methods for Analysis of Process Models**”, International Journal of Computer-Aided Engineering, vol. 3, no. 4, pages 279-290, 1996.
- [LAWS 94] M. Lawson, H.M. Karandikar, “**A survey of concurrent engineering**”, Concurrent Engineering: Research and Applications, no. 2, 1994.
- [LIU 97] F. Liu, P.B. Luh, B. Moser, “**Scheduling of design projects with resource constraints and uncertain number of design iterations**”, Proceedings of Advanced Intelligent Mechatronics AIM’97, Tokyo, Japan, 1997.
- [LOCH 98] C. Loch, C. Terwiesch, “**Communication and uncertainty in concurrent engineering**”. Management Sci. 44(8), pages 1032–1048, 1998.
- [LORI 95] Ph. Lorino, “**Le déploiement de la valeur par les processus**”, Revue française de Gestion, no. 104, pages 55-75, 1995.
- [MAFF 98] D. Maffin, “**Engineering design models: context, theory and practice**”, Journal of Engineering Design, vol.9, no.4, 1998.
- [McDO 97] J. McDonnell, “**Descriptive models for interpreting design**”, Design Studies, vol. 18, Issue 4, pages 457-473, octobre, 1997.
- [McMA 97] C.A. McMahon, J.C. Cooke, R. A North, “**Classification of error in design**”, International Conference on engineering Design ICED’97, Tampere, pages 119-124, 1997.
- [MEGA 99] R. Megartsi, K. Ayadi, A. Cauvin, J.P. Kieffer, “**L’activité: vers un concept fédérateur pour l’analyse de la conduite des systèmes de production et des processus de conception de produits**”, 3^e Congrès international de génie industriel, Montréal, Québec, mai, 1999.
- [MER 95] S. Mer, A. Jeantet, S. Tichkiewitch, “**Les objets intermédiaires de la conception**”, Le communicationnel pour concevoir, edited by J. Caelen and K. Zreik. Paris: Europia, pages 21-41, 1995.
- [MONY 92] C. Mony, “**Un modèle d’intégration des fonctions conception – fabrication dans l’ingénierie de produit. Définition d’un système mécanique en base de données objet**”, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, mai, 1992.
- [MOVA 03] R. Movahed-Khah, O. Garro, C. Decreuse, “**Les Objets Intermédiaires de Conception dans un processus de conception à distance (GRACC)**”, Colloque AIPPRIMECA-03, La Plagne, France, 2003.
- [MULY 00] T. Mulyanto, “**Conception, Configuration et Incertitude dans le cadre de la Programmation par Contraintes**”, 5^{èmes} Rencontres Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle, Lyon, septembre, 2000.
- [NOYE 97] D. Noyes, M. Aldanondo, T. Boudouh, “**Modèles d’activités pour une conception réactive**”, 2^e Congrès international franco-québécois, Albi, France,

3-5 septembre, 1997.

- [ORNE 69] M.T. Orne, “**Demand characteristics and the concept of quasi-controls**”, in Rosenthal, R., Rosnow, R.L. (Eds), *Artifact in Behavioral Research*, Academic Press, New York, NY, pages 143-79, 1969.
- [OSBO 93] S.M. Osborne, “**Product development cycle time characterization through modeling of process iteration**”, Thèse de Master, Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [PAHL 88] G. Pahl, W. Beitz, “**Engineering Design**”, (edited by K.Wallace), Springer-Verlag, New York, 1988.
- [PAHL 96] G. Pahl, W. Beitz, “**Engineering Design: A systematic approach**”, Springer-Verlag, 1996.
- [PENA 05] E. Pena, “**L'analyse du processus de conception (contexte collaboratif)**”, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2005.
- [PERR 99] J. Perrin, “**Pilotage et évaluation des processus de conception**”, ouvrage collectif du groupe. ECOSIP, Collection Economiques, Ed. L'Harmattan, 1999.
- [PERR 01] J. Perrin, “**Concevoir l'innovation industrielle. Méthodologie de conception de l'innovation**”, CNRS Editions, 2001.
- [PETI 99] F. Petit, “**Interactive Design of a Product and its Assembly System**”, Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, 1999.
- [PRAS 98] B. Prasad, F. Wang, J. Deng, “**A concurrent workflow management process for integrated product development**”, *Journal of Engineering Design*, vol. 9, no. 2, 1998.
- [PROS 95] R. Prost, “**Concevoir, Inventer, Créer. Réflexions sur les pratiques**”, Ed. L'Harmattan, Paris, 1995.
- [PRUV 93] F. Pruvot, “**Conception et Calcul des Machines-outils**”, vol. 1, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, CH-1015 Lausanne, Suisse, 1993.
- [RAMA 97] E. Ramat, C. Lente, C. Tacquard, “**Incertitudes et projets d'innovation : le modèle RAIH**”, *RAIRO – APII – JESA*, vol. 31, no. 4, pages 615-643, 1997.
- [RANK 94] P.G. Ranky, “**Concurrent Engineering and enterprise Modelling**”, *Assembly Automation*, vol. 14, no. 3, pages 14-21, 1994.
- [REIN 83] D.G. Reinertsen, “**The search for new product killers**”, *Electronic Business*, juin, 1983.
- [ROBE 01] A. Rey, “**Le Grand Robert de la langue française**”, Le Robert, 2001.
- [ROGE 97] J. L. Rogers, “**Reducing design cycle time and cost through process resequencing**”, *Proceedings of the International Conference on Engineering*

Design ICED'97, Tampere, août 19-21, 1997.

- [ROOZ 95] N.F. Roozenburg, J. Eeckels, "**Product Design: Fundamentals and Methods**", John Wiley and Sons, 1995.
- [ROSE 63] R. Rosenthal, "**The effects of early data returns on data subsequently obtained by outcome-biased experimenter**", *Sociometry*, 26, pages 487-493, 1963.
- [ROSE 69] R. Rosenthal, "**Experimenter effects in behavioral research**", First ed. The century psychology series, New York : Appleton century crofts, 1969.
- [ROZE 02] P. Rozencajg, D. Corroyer, "**Strategy development in a block design task**", *Intelligence*, vol. 30, Issue 1, pages 1-25, 2002.
- [SALA 95] I. Salau, "**La conception distribuée – Théorie et méthodologie**", Thèse de doctorat, Université de Nancy, 1995.
- [SEAR 72] J.R. Searle, "**Les actes de langage**", Hermann, Paris, 1972.
- [SOHL 92] G. Sohlenius, "**Concurrent engineering**", *Annals of the CIRP*, vol. 41, no. 2, pages 645-655, 1992.
- [SMIT 92] R.P. Smith, "**Development and verification of engineering design iteration models**", Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [SMIT 97a] R.P. Smith, S.D. Eppinger, "**A predictive model of sequential iteration in engineering design**", *Management Science*, vol. 43, pages 1104-1120, 1997.
- [SMIT 97b] R.P. Smith, S.D. Eppinger, "**Identifying Controlling Features of Engineering Design Iteration**", *Management Science*, 43(3), pages 276–293, 1997.
- [SMIT 98] R.P. Smith, P. Tjandra, "**Experimental observation of iteration in engineering design**", *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering*, vol. 10, Issue 2, pages 107-117, 1998.
- [SMIT 99] R.P. Smith, J.A. Morrow, "**Product development process modeling**", *Design Studies*, vol. 20, Issue 3, pages 237-261, mai, 1999.
- [SPER 89] D. Sperber, D. Wilson, "**La pertinence, communication et cognition**", Ed. de Minuit, Paris, (Traduit de l'anglais par Abel Gershenfeld et Dan Sperber), 1989.
- [STAN 02] N. Stanton, C. Baber, "**Error by design: methods for predicting device usability**", *Design Studies*, vol. 23, Issue 4, pages 363-384, 2002.
- [STEW 81] D.V. Stewart, "**The design structure system: A method for managing the design of complex systems**", *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. EM-28, no. 3, pages 71-74, 1981.
- [STEW 92] M.G. Stewart, "**Simulation of human error in reinforced concrete design**", *Research in Engineering Design* 4(1), pages 51-60, 1992.

- [STOY 01] J.L. Stoyell, G. Kane, P.W. Norman, I. Ritchey, “**Analyzing design activities which affect the life-cycle environmental performance of large made-to-order products**”, Design Studies, vol. 22, Issue 1, pages 67-86, janvier, 2001.
- [SU 97] Z. Su, “**La gestion des entreprises transnationales**”, Congrès ACFAS, Université LAVAL, 1997.
- [TERW 98] C. Terwiesch, C. Loch, “**Communication and Uncertainty in Concurrent Engineering**”, Management Science, vol. 44, no. 8, 1998.
- [THOM 01] S. Thomke, D.E. Bell, “**Sequential testing in product development**”, Management Science, vol. 47, no. 2, pages 308-323, 2001.
- [TOLL 98] M. Tollenaere, “**Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils**”, Editions HERMES, Paris, 1998.
- [TORO 94] J.C. Tarondeau, “**Recherche et Développement**”, Edition Vuibert, 1994.
- [TULL 86] C.J. Tully, “**Software Process Models and Iteration in the Software Process**”, Third International Software Process Workshop, IEEE, 1986.
- [ULLM 90] D.G. Ullman, S. Wood, D. Craig, “**The Importance of Drawing in the Mechanical Design Process**”, Computer & Graphics vol. 14, no. 2, pages 263-274, 1990.
- [ULLM 91] D.G. Ullman, “**The Status of Design Theory Research in the United States**”, ICED '91, Zurich, 1991.
- [ULRI 04] K.T. Ulrich, S.D. Eppinger, “**Product Design and Development**”, Irwin/McGraw-Hill, New York, 3rd Edition, 2004.
- [ULRI 93] K. Ulrich, D. Sartorius, S. Pearson, M. Jakiela, “**Including the value of time in Design for Manufacturing decision making**”, Management Science, vol. 39, no. 4, pages 429-447, avril, 1993.
- [VAND 90] D. Vanderveken, “**Meaning and Speech Acts, Principles of language use**”, Cambridge University Press, vol. 1, 1990.
- [VARG 95] C. Vargas, “**Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Mise en œuvre basée sur la propagation de contraintes. Application à la conception d’une culasse automobile**”, Thèse de doctorat en Mécanique, LURPA, École Normale Supérieure de Cachan, décembre, 1995.
- [VERN 92] D. Vernant, “**Approche actionnelle et modèle projectif du dialogue informative**”, Du dialogue, Grenoble : Groupe de recherche sur la philosophie et le langage, pages 295-313, 1992.
- [VINC 02] D. Vinck, “**Ethnographic studies in design activities: looking at the objects too**”, Ethnographic Organizational Studies, St Gallen, Switzerland, 2002.

- [VINC 95] D. Vinck, A. Jeantet, “**Mediating and Commissioning Objects in the Sociotechnical Process of Product Design : a conceptual approach**” Designs, Networks and Strategies, vol. 2, COST A3 Social Sciences, edited by D. Maclean, P. Saviotti, and D. Vinck. Bruxelles: EC Directorate General Science R&D, pages 111-129, 1995.
- [WALL 95] K. Wallace, S. Burgess, “**Methods and tools for decision making in engineering design**”, Design Studies, vol. 16, Issue 4, pages 429-446, 1995.
- [WHEE 92] S.C. Wheelwright, K.B. Clark, “**Revolutionizing Product Development**”, Free Press, New York, 1992.
- [WHIT 90] D.E. Whitney, “**Designing the Design Process**”, Res. Engineering Design. 2, pages 3-13, 1990.
- [YASS 00] A. Yassine, “**Iteration and Negotiation in Coupled Product Development**”, CTPID Report, Cambridge, MA: MIT Press, 2000.
- [YASS 01] A. Yassine, D.E. Whitney, T. Zambito, “**Assessment of rework probabilities for simulating product development processes using the design structure matrix**”, Proceedings of the 13th International Conference on Design Theory and Methodology DTM'01, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, septembre, 2001.
- [YASS 99] A. Yassine, K. Chelst, D. Falkenburg, “**A Decision Analytic Framework for Evaluating Concurrent Engineering**”, IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 46, no. 2, pages 144-157, 1999.
- [ZETT 96] F. Zettelmeyer, “**On the Optimality of Marker Orientation**”, University of Rochester Working Paper, juin, 1996.

ANNEXES

ANNEXE 1:

A. Le modèle WTM (Work Transformation Matrix)

Le modèle WTM a été développé par *Smith* et *Eppinger* pour évaluer la durée et la charge d'une activité et aussi la durée globale du projet. Le modèle WTM est une extension de la DSM qui intègre une évaluation des activités en termes de temps estimés pour chaque activité et d'interdépendances entre activités, exprimées par un taux de reprise d'une activité à la fin de l'exécution d'une autre.

La matrice WTM est composée de deux types d'informations : les durées estimées pour les différentes activités, considérées de façon isolée les unes des autres sont représentées sur la diagonale et les éléments hors diagonale représentant les pourcentages de reprise de chaque activité en fonction des résultats des activités dont elle dépend, voir la Figure 92.

	A	B	C
A		X	
B	X		X
C	X	X	

La matrice DSM

	A	B	C
A	4	0.2	
B	0.4	7	0.5
C	0.3	0.1	6

La matrice WTM

Figure 92- Exemple d'une matrice WTM

Les données nécessaires pour construire une matrice WTM ne sont pas difficiles à identifier. Pour calculer les durées et le coût d'un projet, il est nécessaire de faire les hypothèses suivantes :

- toutes les activités sont exécutées à chaque itération;
- chaque activité donne une quantité déterministe de reprise pour les autres activités ;
- pour chaque activité le taux de reprise est constant;
- les temps de base des activités (isolées) sont constants.

Pour estimer les coûts d'une activité inter couplée, le modèle WTM se décompose en deux matrices : une matrice des temps W et une matrice de reprise A .

Le vecteur de travail (u_t) est un n -vecteur, où « n » est le nombre des activités couplées à accomplir. Chaque élément du vecteur de travail contient la quantité de travail à faire pour chaque activité après l'itération « t ».

Le vecteur initial de travail u_0 est un vecteur qui indique que tous les travaux restent à terminer sur chaque activité au début du processus itératif : $u_0 = (1, 1, \dots, 1)^T$; T - nombre d'activités du processus de conception ;

Pendant chaque itération, tous les travaux sont terminés pour toutes les activités de conception.

Cependant, le travail dans chaque activité causera une certaine reprise pour toutes les autres activités qui dépendent d'information de sa part.

Soit u_t le vecteur de travail représentant le taux de reprise pour chaque activité à la $t^{\text{ème}}$ itération.

En conclusion, chaque itération produit un changement du vecteur de travail selon:

$u_{t+1} = Au_t$ ou $u_t = A^t u_0$, où chacune des entrées a_{ij} dans A implique d'effectuer une unité de travail sur l'activité « j » de crée a_{ij} unités de travail pour l'activité « i ».

La matrice "A" est alors la matrice de puissance de dépendances du WTM.

La somme de tous les vecteurs de travail est le vecteur de travail U , représentant le nombre total de fois que chacune des activités a été essayée pendant toutes les M itérations:

$$U = \sum_{t=0}^M u_t = \sum_{t=0}^M A^t u_0 = \left(\sum_{t=0}^M A^t \right) u_0$$

Le modèle U est donc exprimé en unités par rapport à la quantité initiale de travail, effectuée dans chaque activité, par la première itération.

Si W est une matrice diagonale qui contient les durées d'activités sur la diagonale, alors $T = WU$ est un vecteur qui contient la quantité de temps que chaque activité exigera pendant itération M .

La Décomposition de la valeur propre

Si A a linéairement des vecteurs propres indépendants (c.-à-d. valeurs propres distinctes de n , où A est une matrice de $n \times n$), alors nous pouvons décomposer A en :

$A = S\Lambda S^{-1}$, où Λ est une matrice diagonale des valeurs propres de A , et S est la matrice de vecteur propre correspondante.

Les puissances de A peuvent être trouvées par: $A^t = S\Lambda^t S^{-1}$

Le travail total U est exprimé comme:

$$U = S \left(\sum_{t=0}^M \Lambda^t \right) S^{-1} u_0$$

A la limite, en tant que M s'approche de l'infinie, l'équation ci-dessus devient:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^M \Lambda^t = (I - \Lambda)^{-1}, \text{ où } I = \text{matrice d'identité.}$$

En conclusion, $U = S(I - \Lambda)^{-1} S^{-1} u_0$

Interprétation de la structure propre

Les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice A déterminent le taux et la nature de la convergence du processus de conception.

Le vecteur propre correspondant à chaque valeur propre caractérise la contribution relative de chacune des activités du travail qui converge aux taux donnés.

L'importance de la valeur propre n caractérise le taux géométrique de convergence du mode n .

L'entrée m dans le vecteur propre correspondant n caractérise la contribution relative de la tâche m sur le mode de conception n .

La plus grande valeur propre identifiera le mode de conception le plus lent, ou le mode de conception qui joue le rôle le plus significatif en déterminant le taux géométrique de convergence.

La plus grande entrée dans le vecteur propre correspondant identifiera la tâche de conception qui a la plus grande contribution à ce mode de conception.

De cette manière, nous pouvons identifier les caractéristiques de chaque itération.

$$\text{facteur_de_rang}_i = \frac{1}{1 - \lambda_i}, \text{ où } \lambda_i = \text{la valeur propre numéro } i.$$

Par conséquent, en rangeant les valeurs propres nous pouvons ranger les modes de conception. En rangeant les entrées dans le vecteur propre correspondant, nous pouvons ranger les contributions des activités à ces modes.

B. Le modèle probabiliste séquentiel

Le modèle permet la réorganisation d'un groupe d'activités couplées afin de réduire le temps d'exécution.

Ce modèle est basé sur la méthode DSM (Design Structure Matrix) et suppose que chaque activité séparable prend une quantité de temps finie et connue, mais l'activité doit être répétée un certain nombre de fois afin de résoudre les conflits de priorité.

Chaque activité est soumise à une répétition avec une probabilité qui est dépendante de la manière de couplage entre activités.

Pour déterminer la durée totale du processus, le modèle utilise les chaînes de Markov. Aussi il utilise une matrice carrée où les éléments de la diagonale principale sont les durées d'activités et les autres éléments sont les probabilités de refaire, voir la Figure 93.

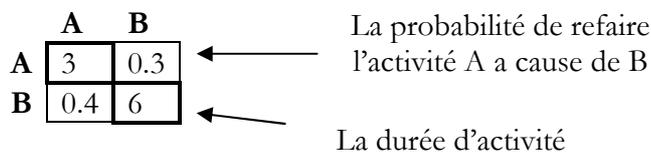


Figure 93- Modèle DSM séquentielle itératif

Dans la Figure 93 l'activité A prend 3 unités du temps si elle est réalisée séparément. Les activités A et B sont couplées, mais si l'activité A est réalisée avant celle de B, il y a une probabilité de 0,3 que A sera à refaire à cause de B (elle nécessite encore 3 unités du temps).

Si B est réalisée avant A, il y a une probabilité de 0,4 que B sera à refaire à cause de A.

Pour déterminer la durée totale une forme modifiée de l'élimination Gaussienne a été utilisée.

Pour la matrice 3X3 (Figure 94) la chaîne de Markov A-B-C a été obtenue.

	A	B	C
A	4	0.2	
B	0.4	7	0.5
C	0.3	0.1	6

Figure 94- La matrice 3X3 d'un processus de conception

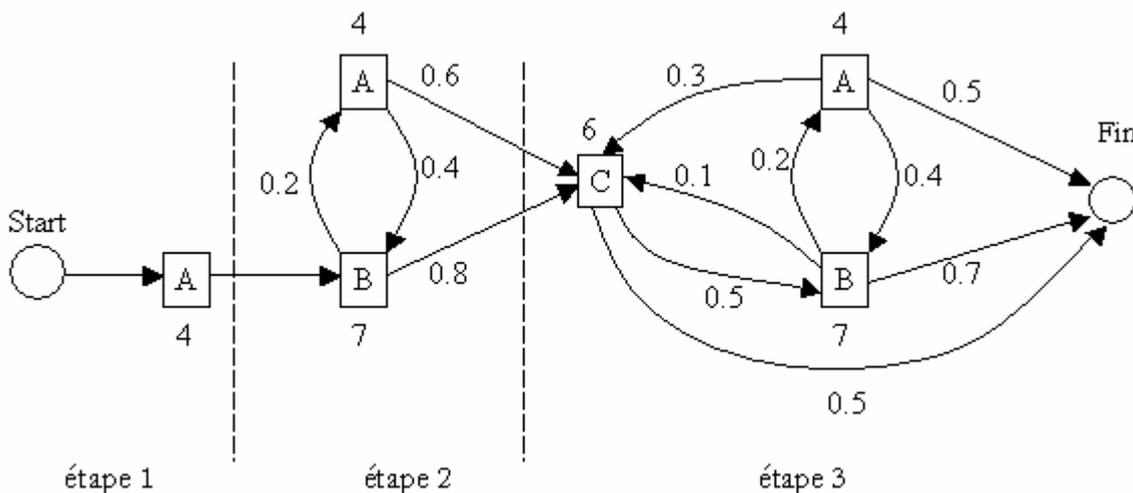


Figure 95- La chaîne de Markov A-B-C

La chaîne est divisée en trois étapes qui correspondent au processus de l'accomplissement d'activités. L'activité A est exécutée d'abord, avec une probabilité de réussite de 1. L'activité B est alors essayée, qui réussit avec une probabilité de 0,8. L'activité A doit être répétée avec une probabilité de 0,2. A et B réitèrent alors jusqu'à ce que leurs résultats soient compatibles, lorsque l'activité C est exécutée pour la première fois. Après l'activité C, il y a une probabilité de 0,5 que la conception soit complète, mais avec une probabilité de 0,5, il doit y avoir une itération parmi A, B et C pour accomplir le projet.

Algébriquement, le calcul est semblable à l'élimination gaussienne, bien que la substitution *en arrière* gaussienne standard ne soit pas utilisée.

Soient r_A , r_B et r_C les durées restantes à chacun des trois noeuds dans la troisième étape de la chaîne. Ces trois quantités sont reliées par :

$$\begin{aligned} r_A &= 0,4 r_B + 0,3 r_C + 4 \\ r_B &= 0,2 r_A + 0,1 r_C + 7 \\ r_C &= 0,5 r_B + 6 \end{aligned}$$

Ce qui peut être récrit comme :

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.4 & -0.3 \\ -0.2 & 1 & -0.1 \\ 0 & -0.5 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r_A \\ r_B \\ r_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 7 \\ 6 \end{bmatrix}$$

Après élimination gaussienne, on peut avoir :

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.4 & -0.3 \\ 0 & 0.92 & -0.16 \\ 0 & 0 & 0.91 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r_A \\ r_B \\ r_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 7.8 \\ 10.23 \end{bmatrix}$$

La valeur du paramètre r_C est :

$$r_C = \frac{10.23}{0.91} = 11.21$$

Pour les deux noeuds dans la deuxième étape de la chaîne Markov, où s_A et s_B sont les durées pour cette étape, on peut avoir :

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.4 \\ -0.2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_A \\ s_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 7 \end{bmatrix}$$

Après élimination gaussienne, on peut avoir :

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.4 \\ 0 & 0.92 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s_A \\ s_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 7.8 \end{bmatrix}$$

L'itération débute au noeud B dans la deuxième étape, on doit retenir la valeur de s_B .

$$s_B = \frac{7.8}{0.92} = 8.48$$

Pour la première étape nous avons un seul nœud, avec la durée de la tâche A.

$$t_A = 4$$

La durée totale pour la chaîne de Markov (**A-B-C**) est 23.69 (Somme de r_C , s_B et t_A)

On observe que les équations pour r_C , s_B et t_A sont exprimées en élimination Gaussienne des équations dans la troisième étape. Les temps prévus r_C , s_B et t_A sont les valeurs latérales droites divisées par la diagonale de la matrice du côté gauche. Cette propriété est vraie en général parce que les premières parties de l'itération sont des sous-problèmes de l'étape finale. Cette structure spéciale est exploitée pour établir un algorithme efficace de calcul de la durée total du réseau.

L'algorithme de calcul de la durée

Étape 1 : Transformez la matrice DSM en chaîne de Markov

Au lieu d'utiliser les quantités dans le DSM directement, nous devons les transformer en matrice P qui décrit la chaîne de Markov. Ceci est fait en prenant le négatif de la transposition du DSM, et en insérant ceux le long de la diagonale.

$$P_{ij} = \begin{cases} -dsm_{ij} & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

Étape 2 : Placez les durées des activités dans un vecteur

Les éléments diagonaux du DSM, qui contiennent les temps de chacune des activités, sont placés dans un vecteur séparé b.

$$b_i = dsm_{ii}$$

Étape 3 : Diagonalisez la matrice P

D'habitude, l'équation $Px=b$ est soumise à l'élimination Gaussienne afin de résoudre le system pour x. L'élimination Gaussienne permet de trouver les trois parties : I, D et H (triangulaire *inférieure*, *diagonale*, et le triangulaire *supérieure*) uniques tels que $IDH=P$.

Étape 4 : Utilisez la substitution modifiée en arrière pour trouver x'

L'élément b' est calculé où $b'=I^{-1}b$. La substitution arrière normale résout $DHx = b'$, pour x. Chacun des éléments dans x contient la valeur restante à chacun des noeuds à l'étape finale de la chaîne de Markov.

Puisque nous devons seulement savoir le temps restant au noeud de début de l'étape finale, et nous avons besoin également des temps au noeud de début de chacune des autres étapes, nous pouvons accomplir ceci par $Dx'=b'$ à la place de solution.

$$x' = D^{-1}I^{-1}b$$

Étape 5 : Ajoutez les éléments dans x' pour obtenir la durée totale

Chacun des éléments de x' contient la durée prévue pour chacune des étapes successives de la chaîne de Markov, étant donné que le noeud entrant est le noeud non vu dans les étapes précédentes.

Donc la durée prévue est la somme des éléments dans x'.

$$Durée = \sum_{i=1}^n x'_i$$

Puisque chacun des éléments dans x' est au moins aussi grand que la valeur de l'activité entrante par lui-même (b), la somme des temps de activités est une limite inférieure à la valeur pour n'importe quel ordre.

La limite inférieure apparaîtrait dans la pratique si tous les choix probabilistes entre le succès ou la répétition d'une activité précédente étaient réussis.

La durée minimale d'ordonnement

Pour la matrice 3x3, tous les ordonnancements possibles sont :

Ordonnement	Le temps prévu
A-B-C	23.69
A-C-B	20.43 (minimum)
B-A-C	22.66
B-C-A	28.54 (maximum)
C-A-B	22.23
C-B-A	25.54

Figure 96- Les ordonnancements possibles des activités

ANNEXE 2

La réorganisation des blocs de tâches de conception afin de réduire le nombre d'itérations et la durée du processus de conception

Pour optimiser le déroulement du processus de conception on propose une démarche basée sur l'exécution en parallèle des plusieurs tâches de conception.

Pour exemplifier, on va considérer deux blocs d'activités B1 et B2. Le principe est d'essayer de placer le deuxième en parallèle avec le premier, ou quelques tâches du premier avec les tâches du deuxième.

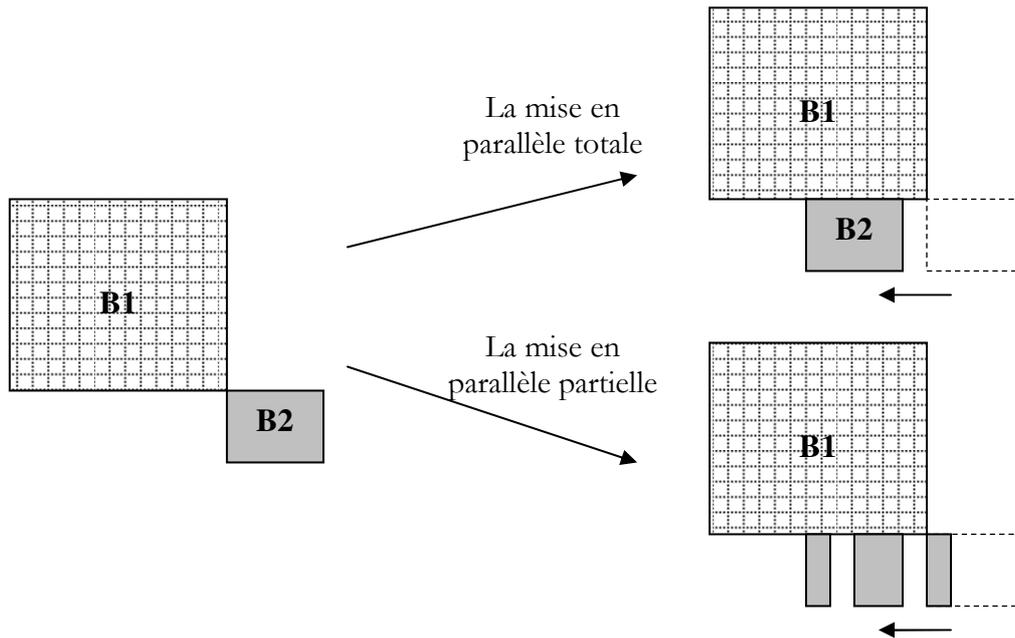


Figure 97- Le principe de mise en parallèle des blocs ou des tâches de conception

Cette démarche est possible dans le cas où l'on connaît préalablement les tâches de conception, les concepteurs nécessaires pour accomplir chaque tâche, les dépendances entre les tâches et l'estimation de la durée pour chaque tâche.

La démarche est la suivante :

- la représentation matricielle des dépendances entre les tâches ;
- l'identification des blocs séparables des tâches par la méthode DSM ;
- la réalisation d'un tableau avec les attributs pour chaque tâche ;
- l'application de l'algorithme de mise en parallèle des tâches.

On considérera l'expérience de GRACC. Pour montrer l'avantage de suivre notre démarche on réalisera, à la fin, une comparaison entre le déroulement proposé par notre démarche et le déroulement réel du processus de conception.

Chaque tâche de conception est une fonction des 2 variables (temps et l'état des ressources). Pour l'état des ressources, dans notre exemple, nous avons un vecteur binaire de quatre variables, les participants à la conception (CP, CL, CC, CE).

CP- chef de projet ; CL- Concepteur Liaisons ; CC- Concepteur Châssis ; DE- Designer Ergonomie.

Les tâches sont nommées en fonction de leur nombre d'ordre et leurs blocs, par exemple, pour la tâche 1 du bloc 1 nous avons t_1b_1 , et pour la tâche 3 du bloc 2, t_3b_2 .

Pour toutes les tâches nous remplirons un tableau (Tableau 15) avec les temps et les concepteurs impliqués (1 si le concepteur participe ou 0 si le concepteur ne participe pas) :

Tâches	Durées (s)	Les concepteurs			
		CP	CL	CC	DE
t_1b_1	58	1	0	1	0
t_2b_1	42	1	0	1	0
t_3b_1	6	1	1	1	0
t_1b_2	4	0	1	0	0

Tableau 15- La participation des concepteurs et les durées pour chaque tâche de conception

On utilisera les notations suivantes :

$Dt_{i b_a}$: la durée de la tâche « i » du bloc « a » ;

$CP_{i b_a}$: la participation du CP dans la réalisation de la tâche « i » du bloc « a ». C'est une valeur booléenne, 0 ou 1 ;

On utilisera les mêmes notations pour CL, CC et DE.

Présentation de l'algorithme :

Etape 1 :

Nous essayons de poser en parallèle la première tâche du deuxième bloc avec la première tâche du bloc 1.

Si la condition $Dt_{t_1b_1} > Dt_{t_1b_2}$ et $\{CP_{t_1b_1}, CL_{t_1b_1}, CC_{t_1b_1}, DE_{t_1b_1}\} \cap \{CP_{t_1b_2}, CL_{t_1b_2}, CC_{t_1b_2}, DE_{t_1b_2}\} = \emptyset$, la tâche t_1b_2 sera mise en parallèle avec la tâche t_1b_1 .

Si non, nous passons à la tâche t_2b_1 et nous analysons la possibilité de parallélisme entre t_1b_2 et t_2b_1 , et on recommencera l'étape 1.

Etape 2 :

Ensuite, nous choisissons la tâche t_2b_2 .

Si $Dt_{t_1b_1} > Dt_{t_1b_2} + Dt_{t_2b_2}$ et $\{CP_{t_1b_1}, CL_{t_1b_1}, CC_{t_1b_1}, DE_{t_1b_1}\} \cap \{CP_{t_2b_2}, CL_{t_2b_2}, CC_{t_2b_2}, DE_{t_2b_2}\} = \emptyset$ les deux tâches peuvent être placées en parallèle, voir la Figure 98.

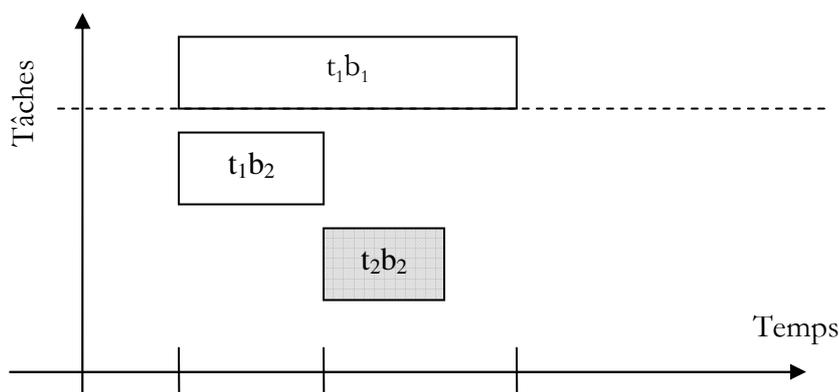


Figure 98- La mise en parallèle de deux tâches du deuxième bloc avec la première tâche du premier bloc

Si non, nous essayons avec la tâche t_2b_1 , et on reviendra à l'étape 1, voir la Figure 99.

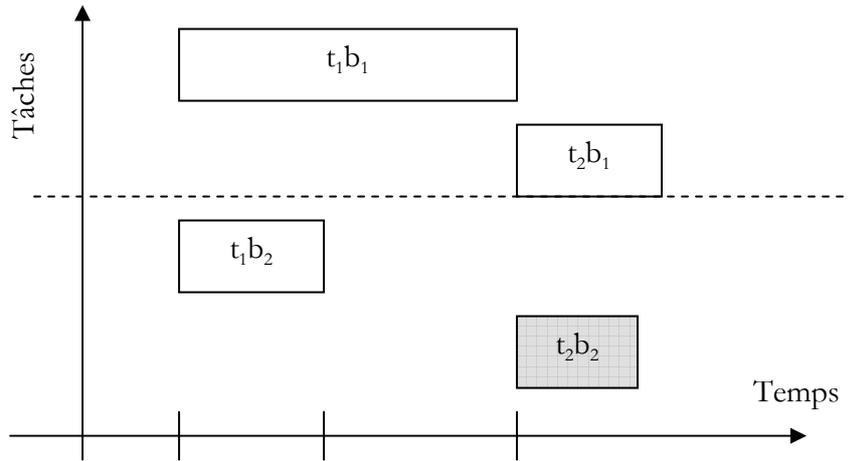


Figure 99- La mise en parallèle d'une tâche du deuxième bloc avec la deuxième tâche du premier bloc

Étape 3 :

Nous choisirons la tâche t_3b_2 et passons à l'étape 3.

Étape 4 :

Si nous ne trouvons pas de parallélismes entre la tâche t_xb_2 et au moins une tâche du bloc 1, l'algorithme s'arrête ici.

Le schéma logique d'algorithme de mise en parallèle des tâches de conception est présenté dans la Figure 100.

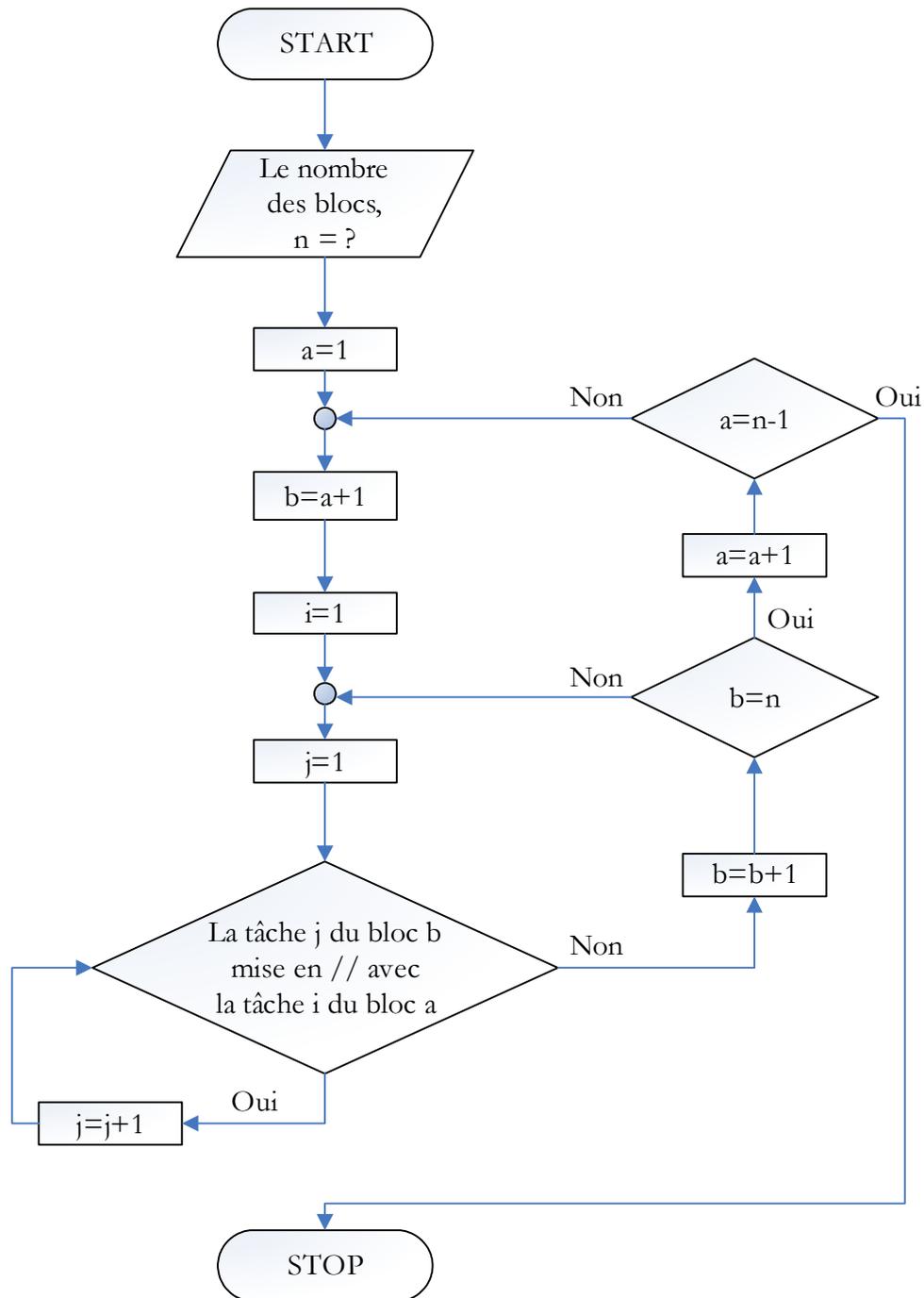


Figure 100- Le schéma logique d'algorithme de mise en parallèle des tâches de conception

Les notations utilisées dans la Figure 100 sont les suivantes :

n : est le nombre total des blocs séparables ;

a : est une variable employée pour exprimer le nombre de blocs utilisés comme référence ;

b : est une variable employée pour exprimer le nombre de blocs qu'on a essayé de placer en parallèle avec les premiers ;

i et j : sont des variables pour définir le nombre des tâches du bloc « a » et « b » ;

Exemple sur l'expérience de GRACC :

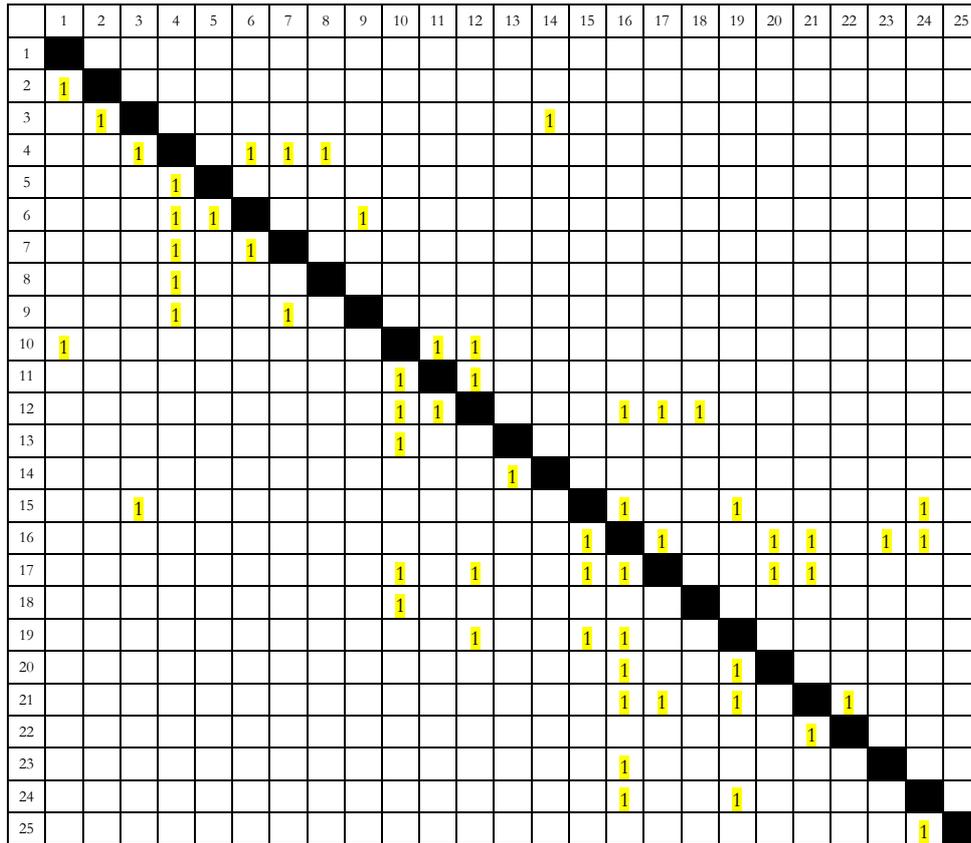


Figure 101- La matrice DSM des dépendances entre les tâches de conception

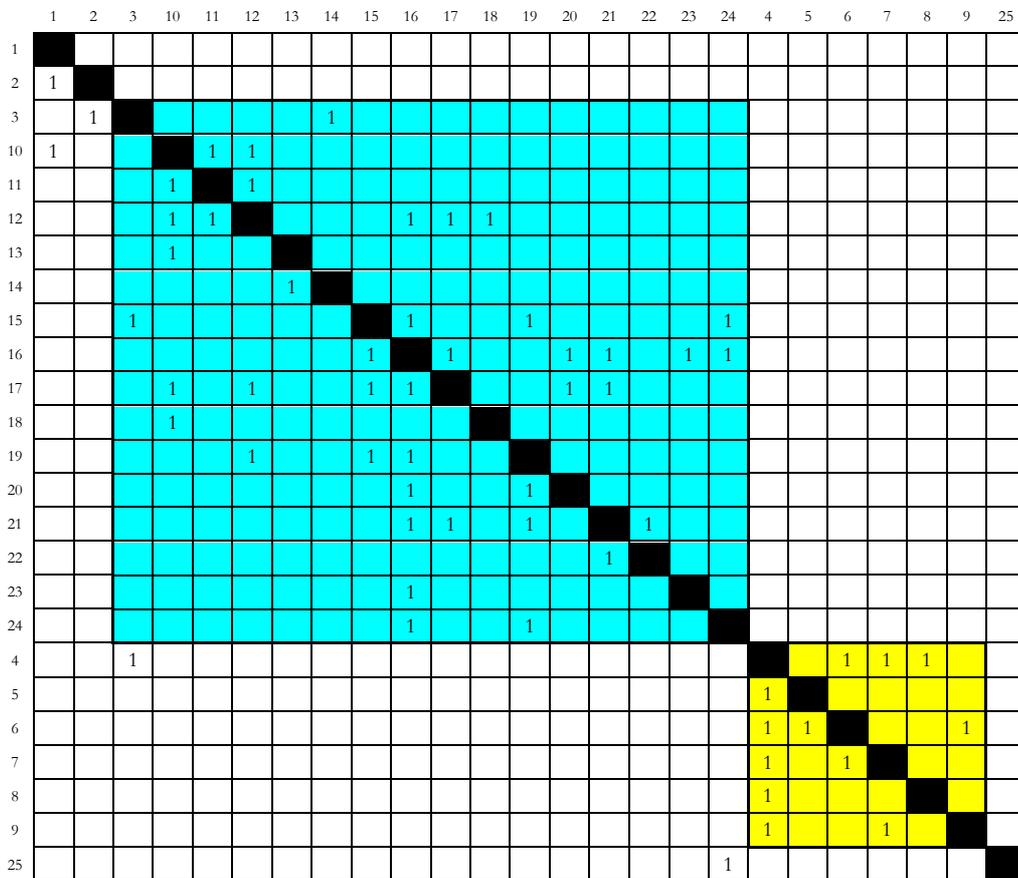


Figure 102- La matrice DSM réarrangée, avec les blocs séparables

Pour l'identification des blocs séparables on va utiliser l'algorithme de diagonalisation de la matrice DSM, voir la Figure 102.

Par le re-ordonnancement des tâches de la matrice DSM, nous pouvons réduire le nombre d'itérations et nous obtenons deux blocs séparables (le schéma 8). Les deux blocs peuvent être réalisés en parallèle.

Nous avons simulé le déroulement du « nouveau processus » pour mesurer la réduction de temps de conception. Nous avons considéré pour cette simulation le même nombre de ressources pour réaliser la conception. Ensuite, on a fait une comparaison entre le déroulement réel du processus (Figure 103) et le déroulement simulé (Figure 104).

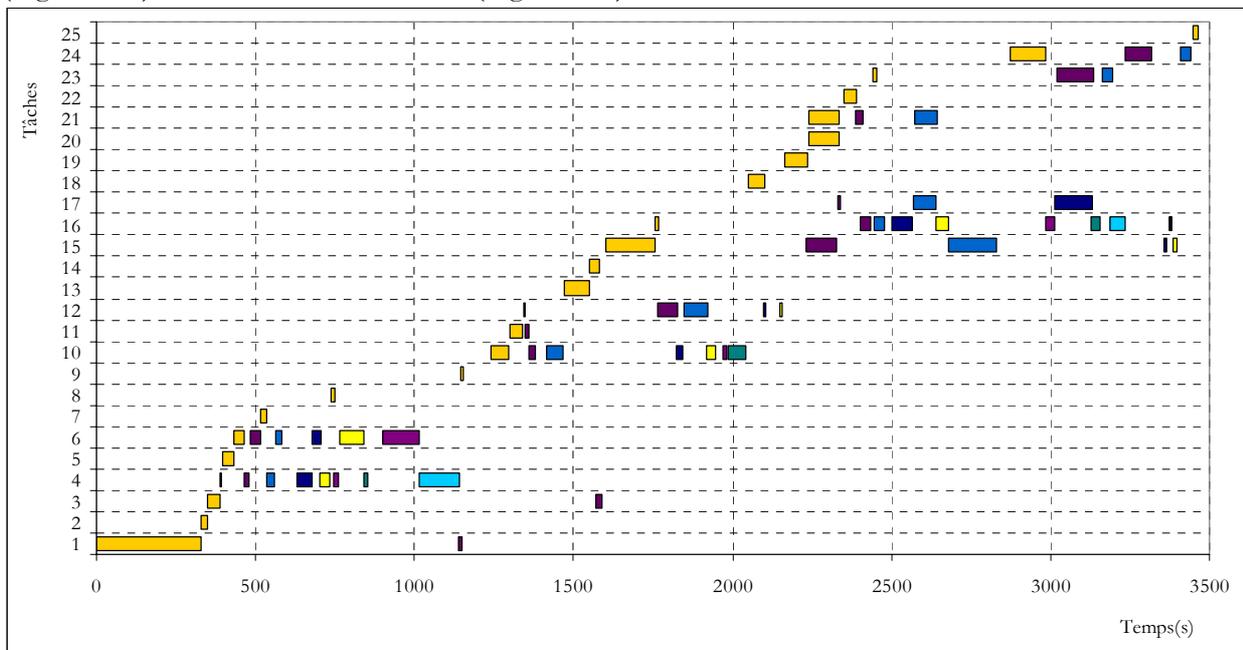


Figure 103- Le diagramme de GANTT du processus réel

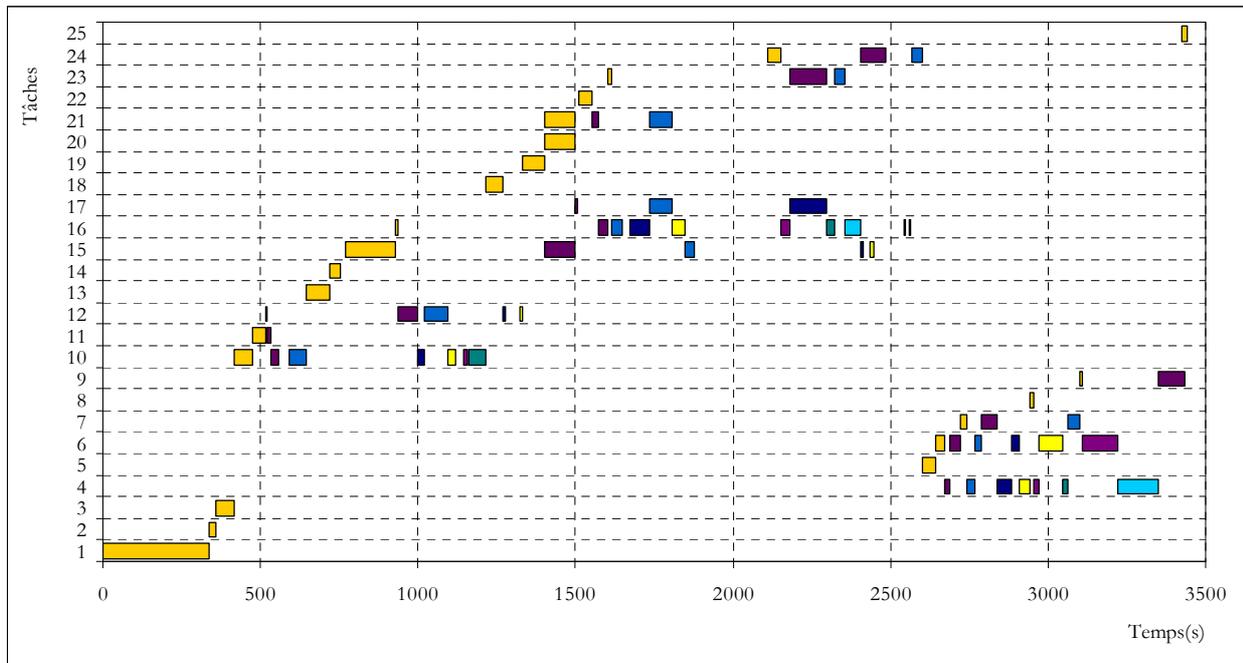


Figure 104- Le diagramme de GANTT du processus simulé

Nous avons constaté que la simulation apporte une réduction de 5% sur le temps total de conception.