



**HAL**  
open science

# Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes.

Khaled Hadj-Hamou

## ► To cite this version:

Khaled Hadj-Hamou. Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2002. Français. NNT : 2002INPT020G . tel-00271348

**HAL Id: tel-00271348**

**<https://theses.hal.science/tel-00271348v1>**

Submitted on 8 Apr 2008

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

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

# THESE

présentée à

## L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

en vue de l'obtention du titre de

### DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : SYSTÈMES INDUSTRIELS

**Par M. Khaled HADJ-HAMOU**

---

### Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes.

---

Soutenue le 10 décembre 2002 devant la commission d'examen composée de :

<b>M. Michel TOLLENAERE</b> Professeur à l'ENSGI de Grenoble	Président
<b>M. Pierre DEJAX</b> Professeur à l'École des Mines de Nantes	Rapporteurs
<b>M. Pierre-Alain YVARS</b> Maître de Conférences Habilité ISCM-CESTI, Saint-Ouen	
<b>M. Michel ALDANONDO</b> Professeur à l'École des Mines d'Albi-Carmaux (Directeur)	Examineurs
<b>M. Jacques LAMOTHE</b> Maître Assistant à l'École des Mines d'Albi-Carmaux (Codirecteur)	
<b>M. Jean-Marc LE LANN</b> Professeur à l'ENSIACET de Toulouse	
<b>Mme Caroline THIERRY</b> Maître de Conférences à l'Université de Toulouse Le Mirail	
<b>M. Emmanuel CAILLAUD</b> Professeur à l'Université de Strasbourg	
<b>M. Jean COSAULT</b> Chef de Projet, SY Systems Technologies France SAS, Toulouse.	

Cette thèse a été préparée au Centre Génie Industriel, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.



## Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au Centre de Génie Industriel de l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.

En premier lieu, je voudrais manifester toute ma reconnaissance à mes deux directeurs de thèse, MM. Michel Aldanondo et Jacques Lamothe pour leur disponibilité, leurs apports et pour toute la confiance qu'ils m'ont accordée au cours des trois années de thèse. Leurs compétences et leurs conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever ce travail. Je leur suis également reconnaissant pour leur proximité et leurs qualités humaines qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer ma gratitude à M. Emmanuel Caillaud, Professeur à l'université de Strasbourg, pour toute son aide pendant ce projet de thèse et pour avoir participé tant à l'encadrement qu'au jury d'évaluation. Ses conseils m'ont permis de mener plus loin ma réflexion et m'ont encouragé à réaliser ce travail.

Je suis sensible à l'honneur que me font les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail :

J'exprime ma reconnaissance à M. Michel Tollenaere, Professeur à l'ENSGI de Grenoble, pour avoir accepté d'être président du jury.

J'adresse mes remerciements à M. Pierre Dejax, Professeur à l'Ecole des Mines de Nantes, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail de thèse en acceptant d'être rapporteur.

J'adresse également mes remerciements à M. Pierre-Alain Yvars, Maître de Conférences Habilité au CESTI de Saint-Ouen, pour avoir bien voulu se charger de la tâche de rapporteur.

Que Mme Caroline Thierry, Maître de Conférence à L'université de Toulouse Le Mirail, trouve ici ma profonde gratitude pour avoir accepté de contribuer à l'évaluation de ce travail et pour toutes ses critiques très enrichissantes.

J'adresse les profonds remerciements à M. Jean-Marc Le Lann, Professeur à l'ENSIACET de Toulouse, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail en acceptant d'être membre du jury.

Je remercie M. Jean Cosault, Chef de Projet chez Siemens-Automotive à Toulouse, pour sa disponibilité lors de mes visites en entreprise et sa participation au jury.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel de l'Ecole, particulièrement les acteurs du Centre de Génie Industriel pour leur soutien : M. Lionel Dupont, Hervé, Paul, Didier, Isabelle, Béatrice, Danièle et Marc-André.

Je ne saurais oublier tous les thésards du centre pour leur soutien et leur aide. Je pense bien sûr aux thésards de ma génération Schéhérazade, David, Franck et Guillaume, aux anciens thésards Marc, Lionel et Sophie, et à la nouvelle génération : Matthieu L., Matthieu D., Elise, Carmen et Benali.

Evidemment, je n'oublie pas de remercier très vivement tous ceux qui m'ont permis de passer trois années fabuleuses à l'Ecole des Mines. Je pense particulièrement à Nadia, Schéhérazade, Serge, David, Franck, Petra, Marc, Cathy, et Jaow, Béné, Buff, Alf, Fofie et Charly.

Enfin, c'est avec beaucoup d'émotion que je remercie toute ma famille et tous mes proches.

Pour Papa et Maman



# Table des Matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
1. Cadre général.....	1
2. Eléments liés à la conception de produits.....	2
2.1. Problèmes liés au processus de conception de produits.....	3
2.2. Pistes de solutions abordées.....	4
2.3. Conclusion.....	5
3. Eléments liés à la chaîne logistique .....	5
3.1. Problèmes liés à la conception de chaînes logistiques.....	6
3.2. Pistes de solutions abordées.....	7
3.3. Conclusion.....	8
4. Intégration dimensionnement chaîne logistique et conception produit .....	8
5. Terrain spécifique d'application.....	11
6. Plan de lecture.....	12

## **Partie I. Contribution à l'aide à la conception de produits**

<b>Chapitre 1. Une démarche de conception de produits à forte diversité.....</b>	<b>17</b>
1.1. Introduction et objectifs .....	17
1.2. Activité de conception de produits : état de l'art .....	18
1.2.1. Introduction .....	18
1.2.2. Activité et processus de conception .....	18
1.2.3. Les phases du processus de conception.....	19
1.2.3.1. Elaboration du cahier de charges .....	20
1.2.3.2. Spécification des principes .....	21
1.2.3.3. Conception d'ensemble.....	21
1.2.3.4. Conception détaillée .....	21
1.2.4. Classification de types de conception.....	22
1.2.4.1. Conception routinière ou prédéfinie.....	23
1.2.4.2. Conception innovante.....	23
1.2.4.3. Conception créative.....	24
1.2.5. Conception intégrée et concurrent engineering.....	26
1.2.5.1. Définitions .....	26
1.2.5.2. Outils .....	27

1.2.6. Conception et diversité des produits .....	28
1.2.6.1. La différenciation retardée.....	28
1.2.6.2. La conception modulaire .....	29
1.2.6.3. La standardisation .....	30
1.2.7. Conclusion.....	31
1.3. Proposition de démarche de préconception et de personnalisation de produits....	31
1.3.1. Introduction .....	31
1.3.2. Le système de distribution électrique .....	32
1.3.2.1. Définition fonctionnelle.....	32
1.3.2.2. Définition physique .....	34
1.3.2.3. Définition géométrique.....	36
1.3.2.4. Fabrication et d'assemblage du câblage.....	37
1.3.3. Démarche globale de conception.....	38
1.3.3.1. Conception sur mesure .....	38
1.3.3.2. Conception d'un produit unique .....	38
1.3.3.3. Conception par packs.....	38
1.3.4. Démarche de conception proposée pour un pack .....	40
1.3.4.1. Définition fonctionnelle.....	42
1.3.4.2. Définition technologique.....	45
1.3.4.3. Définition géométrique.....	47
1.3.4.4. Définition des modules.....	48
1.3.4.5. Les besoins d'aide .....	49
1.3.5. Résultats de la conception.....	50
1.4. Conclusion.....	50
<b>Chapitre 2. Outils d'assistance à la démarche de conception de produits .....</b>	<b>53</b>
2.1. Introduction .....	53
2.2. Etat de l'art : ingénierie des connaissances en conception .....	53
2.2.1. Modèles produit et modèles processus de conception .....	54
2.2.1.1. Modèles produit.....	54
2.2.1.2. Modèles processus de conception.....	59
2.2.2. Le domaine de l'Intelligence Artificielle appliqué à la conception.....	62
2.2.2.1. A base de règles.....	63
2.2.2.2. A base de cas (CBR pour Case-Based Reasoning).....	64
2.2.2.3. A base de contraintes .....	65
2.2.3. Contraintes, conception et configuration .....	67
2.2.3.1. CSP : propagation et satisfaction des contraintes .....	67
2.2.3.2. Intérêt et inconvénients d'application des CSP pour la conception .....	68
2.2.3.3. Les CSP conditionnels (Cond CSP).....	69
2.2.3.4. La configuration de produits.....	70
2.3. Modèles et outils d'assistance à la démarche .....	73

2.3.1. Eléments génériques de modélisation produit et processus de conception .....	73
2.3.2. Etapes de la démarche et outils d'assistance à base de contraintes.....	75
2.3.2.1. Définition fonctionnelle.....	76
2.3.2.2. Définition technologique.....	82
2.3.2.3. Définition géométrique et définition de modules.....	87
2.3.2.4. Conclusions et discussions .....	87
2.3.3. Proposition d'outils d'assistance à base de modèles génériques exploités par les modeleurs CAO.....	88
2.3.3.1. Définition géométrique.....	89
2.3.3.2. Définition de modules .....	91
2.4. Conclusions .....	92

## **Partie II. Contribution à la conception de chaînes logistiques**

### **Chapitre 3. Problématique de choix de solution de conception de produit ..... 95**

3.1. Introduction .....	95
3.2. Définition du problème .....	95
3.3. Représentation de l'espace de solutions .....	96
3.3.1. Graphe de la Demande.....	97
3.3.2. Graphe de Pack.....	98
3.3.3. Nomenclature Générique.....	99
3.4. Première recherche de solution pour la diversité.....	100
3.4.1. Problème et hypothèses.....	100
3.4.2. Principe de recherche de solution.....	101
3.4.3. Exemple .....	102
3.5. Besoin de prise en compte de la chaîne logistique.....	106

### **Chapitre 4. Etat de l'art : conception et configuration de chaîne logistique ..... 107**

4.1. Introduction .....	107
4.2. Définitions.....	107
4.3. Gestion de la chaîne logistique .....	109
4.4. Planification de la chaîne logistique .....	109
4.4.1. Classification fonctionnelle .....	110
4.4.1.1. Décisions d'approvisionnement .....	110
4.4.1.2. Décisions de production.....	110
4.4.1.3. Décisions de Distribution.....	110
4.4.2. Décisions temporelles.....	110
4.4.2.1. Décisions stratégiques .....	110

4.4.2.2. Décisions tactiques .....	111
4.4.2.3. Décisions opérationnelles.....	111
4.5. Problématique de conception et de configuration de chaînes logistiques .....	112
4.5.1. Conception de chaîne logistique.....	112
4.5.2. Caractéristiques des modèles d'optimisation.....	113
4.5.3. Un modèle de référence.....	116
4.5.3.1. Énoncé du problème.....	116
4.5.3.2. Formulation standard du problème .....	117
4.5.4. Travaux de recherche et principaux modèles d'optimisation.....	119
4.6. Bilan et conclusion .....	126
<b>Chapitre 5. Un modèle de conception de chaîne logistique avec nomenclature</b>	
<b><i>ET/OU</i></b> .....	<b>129</b>
5.1. Introduction .....	129
5.2. Composantes et hypothèses du modèle .....	129
5.2.1. Nomenclature générique des articles .....	129
5.2.2. Hypothèses sur la structure générique du réseau.....	131
5.2.2.1. Les installations du réseau .....	132
5.2.2.2. Les technologies de fabrication et d'assemblage.....	133
5.2.2.3. Le stockage .....	134
5.2.2.4. Les clients.....	134
5.2.2.5. Les liens de transport .....	134
5.2.3. Conclusion.....	135
5.3. Formulation du problème .....	135
5.4. Les notations utilisées .....	136
5.4.1. Les ensembles .....	136
5.4.2. Les indices .....	137
5.4.3. Les paramètres coûts.....	137
5.4.4. Autres paramètres.....	137
5.4.5. Les variables de décision .....	138
5.4.5.1. Les variables entières.....	138
5.4.5.2. Les variables réelles .....	139
5.5. Formulation mathématique du modèle .....	139
5.5.1. La fonction objectif.....	140
5.5.2. Les contraintes .....	141
5.5.2.1. Contraintes sur la structure de la nomenclature générique.....	141
5.5.2.2. Contraintes sur les variables réelles du modèle .....	143
5.5.2.3. Contraintes de conservation de flux d'articles sur les nœuds.....	144
5.5.2.4. Contraintes d'existence d'au moins un site de production.....	148

---

5.5.2.5. Contraintes sur les technologies de fabrication et d'assemblage dans les installations .....	149
5.5.2.6. Contraintes sur les capacités de production dans chaque installation.....	149
5.5.2.7. Contraintes sur le transport des articles physiques .....	150
5.5.2.8. Contraintes sur les stocks des articles physiques.....	150
5.5.2.9. Contraintes sur les variables binaires et entières .....	152
5.6. Conclusion.....	153
<b>Chapitre 6. Application industrielle .....</b>	<b>155</b>
6.1. Introduction .....	155
6.2. Nomenclature générique .....	155
6.3. Réseau logistique générique .....	156
6.4. Expérimentations .....	158
6.4.1. Résolution pour une demande donnée .....	159
6.4.2. Problème de localisation et d'allocation.....	162
6.4.3. Problème de suréquipement .....	163
6.4.4. Intérêt du problème mixte .....	164
6.5. Conclusions et extensions .....	165
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>167</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>171</b>



# Liste des Figures

Figure I.1 – Les objectifs communs conception produit/conception chaîne logistique.....	2
Figure I.2 – Conception produit/chaînes logistique : organisation séquentielle .....	9
Figure I.3 – Intégration conception de produits et de chaînes logistiques.....	9
Figure I.4 – Processus successifs de préconception de produit et de réseau logistique.....	10
Figure I.5 – Intégration processus de conception produit/chaînes logistique.....	11
Figure I.6 – Plan de lecture du manuscrit.....	13
Figure 1.1 – Phases du processus de conception [Pahl et Beitz, 1996].....	20
Figure 1.2 – Types de conception et nature de produits.....	23
Figure 1.3 – Espace des solutions de conception routinière, innovante et créative [Gero, 2001] .	24
Figure 1.4 – Schéma global de conception [Kota et Ward, 1991].....	25
Figure 1.5 – Décomposition fonctionnelle du câblage automobile [Hadj-Hamou <i>et al.</i> , 2001b] ...	33
Figure 1.6 – Eléments du câblage pour l'automobile .....	34
Figure 1.7 – Schémas de principe d'une fonction électrique .....	35
Figure 1.8 – Exemples d'architectures globales du câblage .....	37
Figure 1.9 – Niveaux de diversité et de productivité des trois scénarios de conception.....	39
Figure 1.10 – Approche par packs de conception du câblage.....	40
Figure 1.11 – Phases de notre démarche de conception de pack .....	42
Figure 1.12 – Schéma logique validé de la fonction lève-vitre électrique avant pour un pack.....	45
Figure 1.13 – Schéma de principe de la fonction lève-vitres avant avec les calculateurs associés .	47
Figure 1.14 – Exemple de schéma géométrique de la fonction lève-vitre.....	48
Figure 1.15 – Décomposition du pack lève-vitre en deux modules : conducteur et passager.....	49
Figure 1.16 – Solutions possibles de conception de packs de câblage.....	50
Figure 2.1 – Modèle fonctionnel du disque frein [Tollenaere et Constant, 1997].....	55
Figure 2.2 – Modèle Produit [Menand et Tollenaere, 2001].....	57
Figure 2.3 – Modèles Produit [Sellini, 1999] [Yvars, 2001].....	58
Figure 2.4 – Modèle du produit Compresseur [Tollenaere, 1995].....	59
Figure 2.5 – Arbre tâches/méthodes [Vargas, 1995].....	61
Figure 2.6 – Processus de configuration.....	71
Figure 2.7 – Connaissances dans un modèle produit .....	71
Figure 2.8 – Relation entre modèles fonctionnels et modèles de nomenclature [Véron, 2001].....	72
Figure 2.9 – Modèle générique de configuration des packs de câblage .....	74
Figure 2.10 – Modèles génériques d'une famille de produits .....	75
Figure 2.11 – Modèles génériques fonctionnel et physique d'une famille de produits.....	76
Figure 2.12 – Modèle générique fonctionnel d'une famille de produits (packs de câblage) .....	77
Figure 2.13 – Modèle générique fonctionnel de la fonction lève-vitre .....	78
Figure 2.14 – Contrainte d'activation de variables.....	79
Figure 2.15 – Contrainte de compatibilité entre deux variables.....	80

Figure 2.16 – Liens entre modèle de domaine fonctionnel et modèle fonctionnel.....	80
Figure 2.17 – Schéma logique validé de la fonction lève-vitre électrique pour un pack.....	81
Figure 2.18 – Modèle générique physique de la fonction lève-vitre .....	83
Figure 2.19 – Choix de calculateurs pour la fonction lève-vitre .....	84
Figure 2.20 – Contrainte de compatibilité entre deux variables technologiques .....	86
Figure 2.21 – Schéma de principe de la fonction lève-vitre avec les calculateurs associés.....	86
Figure 2.22 – Relation entre modèle fonctionnel et physique.....	88
Figure 2.23 – Exemple de matrice générique de routage (fonction lève-vitre).....	90
Figure 2.24 – Points de routage des fils de la fonction lève-vitre .....	91
Figure 2.25 – Définition des modules de pack .....	92
Figure 3.1 – Graphe de le demande .....	98
Figure 3.2 – Graphe de pack .....	99
Figure 3.3 – Nomenclature générique.....	100
Figure 3.4 – Graphe de solutions et principe de calcul du coût global.....	104
Figure 3.5 – Coûts unitaires et degrés de diversité des solutions.....	105
Figure 4.1 – Représentation d'un réseau logistique.....	108
Figure 4.2 – Fonctions et entités présentes dans un réseau logistique.....	108
Figure 4.3 – Systèmes hiérarchiques de planification [Stadler, 2000] .....	112
Figure 4.4 – Variante de la décomposition de Benders [Geoffrion et Powers, 1993] .....	120
Figure 4.5 – Eléments incertains d'une chaîne logistique .....	125
Figure 4.6 – Méthode de résolution à base de scénarios.....	125
Figure 5.1 – Nomenclature générique des articles .....	130
Figure 5.2 – Configuration générique du réseau logistique.....	132
Figure 5.3 – Variables d'existence d'articles et de liens de nomenclature.....	141
Figure 5.4 – Liens de nomenclature d'un article en "ET".....	142
Figure 5.5 – Liens de nomenclature d'un article en "OU" .....	142
Figure 5.6 – Flux des articles physiques sur une installation .....	145
Figure 5.7 – Flux des articles logiques sur une installation .....	146
Figure 5.8 – Flux des articles physiques chez un client.....	147
Figure 5.9 – Flux des articles physiques chez un client .....	148
Figure 6.1 – Nomenclature générique.....	155
Figure 6.2 – Réseau logistique générique.....	156
Figure 6.3 – Processus logistique du câblage automobile .....	158
Figure 6.4 – Solution de produit.....	160
Figure 6.5 – Le réseau optimal.....	162
Figure 6.6 – Diversité des solutions produit en fonction du coût d'existence de référence.....	164
Figure 6.7 – Sensibilité du modèle à la combinatoire de la nomenclature.....	165

# Liste des Tableaux

Tableau 2.1 – Etat des variables du modèle générique après instanciation.....	81
Tableau 2.2 – Contrainte de compatibilité entre deux variables technologiques.....	86
Tableau 3.1 – Exemple de coûts fixes et variables unitaires de packs.....	103
Tableau 3.2 – Exemple de calcul de la répartition des packs par solution .....	103
Tableau 3.3 – Evolution des coûts de solutions suivant la demande .....	105
Tableau 4.1 – Tableau récapitulatif des modèles de conception de chaîne logistique .....	127
Tableau 5.1 – Exemple de signification de lien composé → composant dans la nomenclature générique.....	130
Tableau 6.1 – Prévisions de la demande de câblage sur 8 périodes.....	159
Tableau 6.2 – Capacités dimensionnées des sites de production de modules.....	161
Tableau 6.3 – Capacités dimensionnées des sites de production de calculateurs .....	161
Tableau 6.4 – Capacités dimensionnées des sites de production de modules.....	161
Tableau 6.5 – Diversité des solutions en fonction du coût fixe d’existence des références .....	163
Tableau 6.6 – Temps de calcul en fonction de la combinatoire de la nomenclature .....	164



# Introduction générale

## 1. Cadre général

Depuis le début des années 90, pour survivre à la compétitivité mondiale et au climat d'incertitude qui sévit dans l'environnement économique, l'entreprise doit être capable d'innover constamment et de répondre vite et sans erreurs aux besoins de ses clients. Soumis à des effets de renouvellement et à l'évolution technologique, les produits ont une durée de vie en constante diminution. La notion de temps devient alors un facteur majeur et primordial pour la survie de l'activité industrielle. Les clients, de leur côté, sont de plus en plus exigeants et désirent des solutions individualisées. De plus, devant l'abondance de l'offre, leurs comportements de consommation sont de plus en plus difficiles à prévoir. Le souci de l'entreprise d'être réactive à cette perpétuelle dynamique correspond à un des objectifs principaux de l'activité de conception de produits.

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

D'autre part, la notion de chaîne logistique, recouvrant l'ensemble des entités qui participent au cycle de production des produits, a pris une importance considérable. Elle fait ici référence au réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement, de production et de distribution de produits [Lee et Billington, 1992]. En effet, si une entité de cette chaîne n'assure pas efficacement sa fonction, le produit final ne peut pas être disponible pour le client dans le délai, le coût et la qualité attendus. La dépendance qui s'établit entre l'activité de conception de produits et l'activité de conception de la chaîne logistique s'avère de plus en plus forte. Cette dépendance s'exprime au travers des différentes relations entre ces deux activités et de l'impact des résultats de chacune sur le déroulement de l'autre.

Regrouper les activités d'aide à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique dans une démarche globale contribue à consolider cette relation. Cela constitue le cadre de notre étude.

Afin de mieux situer le contexte de nos travaux, nous les inscrivons dans le cadre de processus de conception de nature "routinière" de produits à forte diversité. Ces processus se retrouvent dans le cas d'actualisations fréquentes du produit ou dans le cas de définition de variante d'une famille d'un produit. Ils s'appuient principalement sur les connaissances et les résultats issus de développements antérieurs.

Nous inscrivons l'activité de conception de chaîne logistique dans un contexte de planification stratégique et tactique. Les décisions qui en découlent permettent de dimensionner la chaîne logistique : le nombre et le choix des fournisseurs, le nombre et la localisation des usines et des centres de distribution, l'affectation des produits, le choix des modes de fabrication et de transport.

Notre travail se propose d'apporter une contribution au développement de méthodes et d'outils d'aide à la conception de produits à forte diversité et de chaînes logistiques de production et de distribution. Par les méthodes et les outils que nous proposons, nous visons d'une part une meilleure maîtrise de la diversité et de la complexité des produits par l'amélioration du processus de conception, et d'autre part la réduction des coûts et des délais de production, de stockage et de distribution par la définition globale de la chaîne logistique appropriée (Figure I.1).

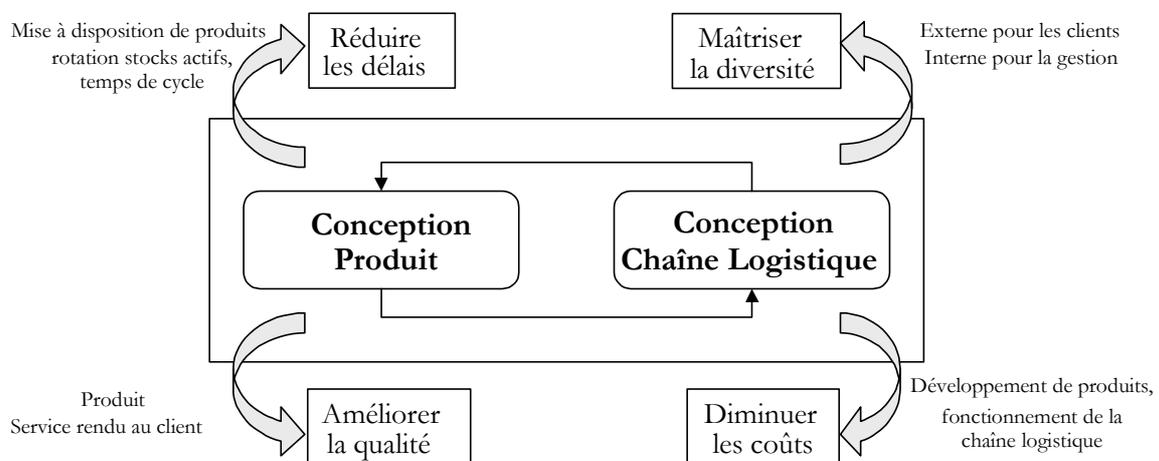


Figure I.1 – Les objectifs communs conception produit/conception chaîne logistique

Dans la première section (2), nous exposons les différents problèmes liés au déroulement de l'activité de conception de produits. Afin d'améliorer le déroulement de cette activité, des pistes sont abordées pour chacun de ces problèmes.

La seconde section (3) aborde les problèmes que pose la conception de chaînes logistiques. Des pistes de solutions sont ensuite exposées.

Nous concluons par l'importance de mettre en évidence le parallèle entre l'activité de conception de produits et l'activité de conception de réseaux logistiques dans un contexte de concurrent engineering.

## 2. Éléments liés à la conception de produits

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons principalement aux processus de conception dits routiniers : ils montrent des tâches répétitives auxquelles se livrent les concepteurs et traduisent la reprise d'un existant pour lequel des modifications et des adaptations sont apportées conformément à d'autres besoins [Chandrasekaran, 1990]. Toutefois, nous n'écartons pas d'éventuelles situations de conception créative ou innovante pour certains besoins spécifiques.

## 2.1. Problèmes liés au processus de conception de produits

Nous synthétisons les principaux problèmes liés au déroulement du processus de conception de produits en quatre points. Par ailleurs, nous constatons que leurs effets et leurs conséquences se rejoignent, mais néanmoins, nous nous efforçons de les distinguer les uns des autres.

### Erreurs de conception

Généralement le processus de conception est défini comme une suite de phases élémentaires. Une exécution séquentielle de ces phases engendre un nombre considérable d'itérations pour converger vers une solution cohérente. A ce fonctionnement s'ajoute un enchaînement séquentiel des différents métiers que regroupe le cycle de vie d'un produit. Les itérations sont dues essentiellement aux erreurs de conception et au changement du besoin client. Les erreurs de conception sont détectées lorsque certains choix faits par un concepteur ne sont pas cohérents avec d'autres choix ou lorsqu'ils sont sources de problèmes pour les autres phases de conception ou les métiers en aval du processus de conception. Plus une solution du produit est remise en cause tardivement dans le cycle de vie du produit, plus les délais de conception et de reconception sont longs et par conséquent plus les coûts sont élevés.

### Délais longs de conception

Le cycle de vie d'un produit est de plus en plus court du fait de l'évolution technologique et des besoins clients de plus en plus diversifiés. Or, lors de l'élaboration d'une nouvelle variante d'un produit ou de la reconception d'un même produit, les concepteurs reconsidèrent souvent l'intégralité du processus de conception sans exploiter l'expérience et la connaissance accumulées. Ceci se traduit par une perte de temps et une multiplication des erreurs de conception.

### Coûts importants de développement

Différents coûts de l'activité de conception sont les conséquences des facteurs erreurs et délais du processus de conception. Une définition sans erreur d'un produit évite des corrections et des modifications de certains choix déjà effectués. Non seulement ces modifications représentent une perte de temps importante, mais en plus les répercussions sur le coût global peuvent être conséquentes. En effet, les retours inutiles en arrière font inévitablement augmenter le coût total et diminuer la qualité du produit. Il est aujourd'hui acquis que plus le produit se trouve dans une étape avancée du cycle, plus le coût des corrections est élevé [Sohlenius, 1992].

### Problème de personnalisation de masse "mass customization"

Dans un marché concurrentiel visant en priorité la satisfaction des clients, les entreprises sont amenées à répondre à des besoins fonctionnels de plus en plus variés. Pour mieux cibler la clientèle, les réponses à ces besoins spécifiques doivent être personnalisées. Les entreprises sont donc conduites à proposer un nombre important de variantes pour un même produit afin de satisfaire tous les besoins. Pour les concepteurs, cette diversité fonctionnelle du besoin doit être maîtrisée pour éviter, en parallèle, une diversification des processus de fabrication, de stockage et de distribution. Evidemment, la diversité fonctionnelle peut être supportée tant qu'elle peut être associée à une faible diversité technique des références produit à gérer. En effet, une faible diversité technique contribue à la maîtrise des coûts sur tout le cycle de vie de produits. L'entreprise doit alors gérer trois niveaux de diversité : la diversité des besoins fonctionnels, la diversité technique (nombre de références produit gérées) et la diversité des processus. Le

problème résultant consiste à satisfaire et à gérer au mieux la diversité du besoin des clients tout en réduisant les coûts et les délais de mise sur le marché. Ce problème est équivalent à rechercher un compromis entre une logique de production de masse, minimisant le coût total de fabrication et de distribution, et une logique marketing caractérisée par une diversité fonctionnelle importante assurant la satisfaction du besoin client.

## **2.2. Pistes de solutions abordées**

Pour pallier aux différents problèmes évoqués et répondre aux interrogations des concepteurs, plusieurs pistes de solutions sont abordées.

### **Réduire les erreurs et les délais de conception**

Initialement, les outils d'aide à la conception étaient conçus de manière à ne conserver que les résultats finaux des différentes solutions de conception. Néanmoins, il s'est vite avéré que la richesse des connaissances, attachées au savoir et au savoir-faire mis en œuvre par les concepteurs, n'était pas prise en compte par ces outils. Réduire les délais et les erreurs de conception, dans le cadre de processus routiniers, nécessite alors une démarche capable de s'appuyer sur des développements antérieurs permettant d'éviter bon nombre d'itérations. Pour cela, il est important d'exploiter au mieux les connaissances relatives aux produits déjà développés, aux processus de conception déjà validés et à l'expérience, savoir et savoir-faire des concepteurs. La réduction des délais et des erreurs de conception nécessite également d'intégrer les différentes connaissances métiers dans la démarche de conception et d'adopter un déroulement simultané pour paralléliser au mieux les différentes phases du processus [Sohlenius, 1992]. Tels sont les objectifs que se proposent d'atteindre les démarches d'ingénierie concourante. Ce type de démarche vise à prendre en compte, dès les premières phases de conception, tous les éléments ayant trait au cycle de vie du produit [Prasad, 1996]. Par conséquent, beaucoup d'itérations et de choix arbitraires sont réduits, ce qui diminue considérablement les erreurs, les itérations et les délais de conception.

### **La minimisation des coûts de développement**

Les solutions abordées pour réduire les délais et les erreurs de conception induisent également des diminutions des coûts de conception et une réduction des coûts des produits. De plus, les concepteurs souhaitent évaluer en permanence, durant le processus de conception, le coût du produit résultant. Cette évaluation permanente du coût permet de guider leurs choix et pouvoir choisir ainsi les solutions les moins coûteuses.

### **Prendre en compte et gérer la diversité du besoin client**

La nécessité de répondre aux exigences des clients incite les concepteurs à proposer des démarches de conception plus proches du besoin client. Le processus de conception doit se faire en interaction avec les clients, de telle sorte que le concepteur et les clients convergent itérativement vers des solutions satisfaisantes. Par solution satisfaisante, nous entendons un ensemble de variantes du produit qui conjugue la diversité fonctionnelle des besoins clients, à savoir des variantes qui couvrent toutes les fonctions et les caractéristiques exigées, et l'intérêt économique du concepteur, c'est-à-dire des variantes produit réalisables et rentables. Les concepteurs peuvent alors proposer plusieurs stratégies de conception. La première consiste à concevoir une variante unique et suréquipée qui répond à tous les besoins fonctionnels ; la seconde à concevoir des variantes sur mesure, définies pour répondre spécifiquement à chaque

besoin fonctionnel ; la troisième à concevoir un ensemble limité de variantes du produit ou "packs" pour répondre à des segments de besoins fonctionnels. Ces trois stratégies reviennent à identifier, pour un ensemble de besoins, une famille de produits correspondant à un ensemble de variantes de produits, décrites chacune par une nomenclature. L'objectif est alors de définir un niveau de diversité technique (nombre et nomenclature des variantes) permettant de réaliser un compromis judicieux entre le coût de possession de l'ensemble des références de variantes et leur coût de suréquipement.

## 2.3. Conclusion

Le résultat final d'un processus de conception est une famille de produits, ou ensemble de variantes, capable de couvrir tous les besoins des clients.

La capitalisation et la réutilisation des connaissances aident à réduire les délais et les coûts de conception. Il est nécessaire d'adopter une démarche de conception s'appuyant sur des modèles génériques qui prennent en compte les différentes formes de diversité. L'objectif est ici double :

- Les modèles génériques permettent de capitaliser les connaissances relatives à la diversité des besoins des clients et à toutes les variantes d'un produit. Ils sont réutilisés pour la conception de chaque variante du produit.
- La démarche de conception permet de supporter la diversité fonctionnelle des besoins et aide à maîtriser les étapes critiques où la diversité technique est générée.

## 3. Eléments liés à la chaîne logistique

Dans le cas de production sur un site unique, adopté de moins en moins par les entreprises, toute l'activité de production et de distribution est assurée par ce seul site. Ainsi, pendant la phase de conception de produits, les choix effectués par le concepteur ne sont pas contraints par les décisions d'ouverture ou de fermeture de sites ou par les choix d'affectation des produits aux sites de production. La situation actuelle offre à l'entreprise un environnement d'une importante diversité pour le choix de localisation de ses sites de production. Le concept de chaîne logistique a pris alors une importance considérable pour des raisons diverses : conquérir de nouveaux marchés en se plaçant au plus près de la demande, se rapprocher des fournisseurs, accéder à une main-d'œuvre moins coûteuse, choisir des modes de transport plus performants, ou encore profiter des effets d'échelle en concentrant la production d'un produit sur un même site.

Certains produits manufacturiers (automobile, aéronautique) ont un système de production orienté produit. Ainsi, à chaque nouvelle génération du produit, c'est l'ensemble du système de production qui doit être revu. C'est principalement ce type de produits que nous considérons dans notre étude.

Ainsi, la configuration finale du réseau logistique doit être également optimisée par rapport aux produits qu'elle délivre. Toutefois, les décisions qui découlent de cette tâche sont d'une part sensibles aux choix effectués au niveau du processus de conception de produits et peuvent, d'autre part, remettre en cause certains choix de conception de produits.

La section (3.1) présente les problèmes liés à la conception de la chaîne logistique dans un contexte de planification stratégique en production multi-sites. La section suivante (3.2) montre l'importance de définir de manière globale la chaîne logistique tout en intégrant les résultats de la conception de produits.

### 3.1. Problèmes liés à la conception de chaînes logistiques

La chaîne logistique devient un élément fondamental pour la maîtrise des coûts de fonctionnement d'une entreprise allant de l'approvisionnement à la distribution. Nous présentons dans cette section les divers problèmes liés à la conception et à la gestion d'une chaîne logistique.

#### Réactivité de la chaîne aux changements

L'instabilité de l'environnement économique oblige les entreprises à être réactives en anticipant tout changement et/ou en absorbant toutes les perturbations. Les perturbations correspondent en général à :

- la réduction des cycles de vie des produits : la reconception des produits implique le plus souvent la reconfiguration des processus de production et le choix de nouvelles technologies de production,
- les aléas internes : la variation des délais d'approvisionnement, de production et de distribution,
- la variation de la demande : la planification de la production se fait sur la base des prévisions de la demande. Les choix de conception de chaîne logistique sont très sensibles à la fiabilité de ces prévisions de la demande. De ce fait, les fluctuations que subit la demande réelle remettent en cause la configuration des processus industriels.

En parallèle, les capacités d'une entreprise à absorber les différentes perturbations sont coûteuses et limitées dans le temps :

- Les investissements en moyens de production et de distribution sont très lourds et s'amortissent lentement. Par conséquent, l'évolution des produits est limitée par la capacité d'évolution des moyens de production et de distribution.
- Pour réagir aux fluctuations de la demande, l'entreprise a le choix d'anticiper la production par le dimensionnement des stocks, de réserver de la capacité de production et de distribution pour les périodes concernées ou de définir des lignes de production et de distribution flexibles.

#### Inadéquation coûts de production et délais logistiques

Une entreprise multi-sites a plusieurs solutions de localisation de ses processus industriels. Par exemple, une usine peut parfois être implantée dans un pays où un facteur de production essentiel est disponible et bon marché (la main-d'œuvre, la matière première, la maîtrise de la technologie, les clients ou le capital) :

- A la recherche de faibles coûts de production, les entreprises choisissent de délocaliser une partie ou l'ensemble de leurs systèmes industriels. Ce choix implique souvent des coûts de transport importants, des délais longs (délais de livraison supérieurs aux délais de fabrication) et des risques supplémentaires tels que la politique d'un pays ou la variation des taux de change.
- A l'opposé, pour bénéficier de faibles coûts de transport avec de courts délais et pour limiter le nombre d'installations à gérer, les entreprises peuvent choisir de ne pas délocaliser leur production et de la conserver proche de leurs clients. Ce schéma implique souvent des coûts de production importants, particulièrement liés aux coûts de main-d'œuvre.

## **Grande diversité des références de produits et des délais courts**

Le souci de satisfaire le besoin client et d'individualiser l'offre contraint les concepteurs de produits à générer beaucoup de références de variantes d'une même famille de produits. Cette diversité technique des références doit pouvoir être obtenue alors que les modes de production et de livraison imposent des délais de plus en plus courts, sans pour autant générer des coûts de gestion des références trop importants. Dans le cas d'industrialisation de produits ayant une diversité technique nulle ou limitée, les processus industriels sont stables. Cette situation correspond à une "production de masse" permettant une forte productivité. A l'opposé, dans une logique de "personnalisation de masse" caractérisée par une forte diversité technique, il est nécessaire d'adapter rapidement les processus de production et de distribution. Pour le fabricant, cette situation est très contraignante. Pour supporter cette diversité technique dans les délais, deux solutions, qui s'avèrent coûteuses, existent :

- L'implantation en parallèle d'une multitude de processus de production et de distribution : le cas extrême étant d'avoir un processus industriel spécialisé pour la production de chaque référence. La spécialisation et la diversification des processus industriels génèrent des coûts importants.
- L'utilisation de moyens flexibles : cette solution consiste à implanter un nombre réduit de moyens de production et de distribution capables de traiter une grande variété de variantes produit. Ainsi, pour répondre à la demande dans les délais, il est nécessaire d'organiser les rotations de séries et de générer des stocks de références par anticipation de la production. Ceci engendre des coûts importants de stockage, d'obsolescence des références et de changement de série.

## **3.2. Pistes de solutions abordées**

Pour résoudre les différents problèmes liés à la conception d'une chaîne logistique, nous abordons dans cette section deux pistes de solutions.

### **Définition globale et intégrée de la chaîne logistique**

La conception ou le dimensionnement d'une chaîne logistique consiste à déterminer le nombre, la localisation et la taille des sites de production et des centres de distribution des différentes variantes d'un produit. Entre deux évolutions antagonistes, à savoir la réduction des coûts de production et la diminution des délais de distribution, il faut rechercher une structure optimale de la chaîne logistique et prendre en compte toutes les contraintes relatives aux différents processus d'approvisionnement, de production et de distribution.

Une approche globale et intégrée de conception de chaînes logistiques a pour but d'améliorer la performance de chaque fonction de la chaîne logistique en tenant compte des objectifs et performances des autres fonctions. Ceci conduit à développer des modèles mathématiques avec une fonction objectif globale, celle de la réduction du coût global de la chaîne logistique ou d'un compromis coûts/délais. Cette optimisation globale couvre ainsi toutes les installations et fonctions de la chaîne logistique.

### **Intégration conception produit et conception chaîne logistique**

La phase de conception du réseau logistique doit se faire en interaction avec le processus de conception de produits. D'une part, la chaîne logistique doit intégrer, dans sa définition globale, la structure de la famille de produits qu'elle doit délivrer (le nombre et la nomenclature de chaque

variante de la famille). Elle doit ainsi prendre en compte, de façon très précise, les conséquences des choix de préconception de produits : le niveau de diversité technique, le niveau de modularité, le niveau de standardisation et la structure des nomenclatures. D'autre part, avant de concevoir en détail les produits, la connaissance de la structure du réseau logistique permet d'évaluer le coût total de plusieurs solutions de préconception d'une famille et de choisir celle qui optimise un critère (par exemple celle qui minimise le coût logistique total).

Le fonctionnement de la chaîne logistique finale doit enfin être considéré : la chaîne doit être flexible et réactive aux éventuelles reconceptions des produits ou variations de la demande.

### 3.3. Conclusion

Pour résumer les différentes problématiques, nous avons insisté sur le fait que pour mieux réagir aux évolutions du marché, les entreprises doivent plus que jamais mettre le client au centre de leurs préoccupations. Ceci est mis en œuvre par l'amélioration de leurs démarches de conception de produits et de chaînes logistiques en ayant comme objectifs communs la satisfaction du client et l'amélioration de son taux de service sur quatre éléments principaux : répondre à des besoins personnalisés et aux exigences du client, réduire les délais de mise sur le marché des produits, diminuer le coût total des produits et des processus, et améliorer la qualité des produits.

Nous plaçons ce travail dans le cadre de chaînes logistiques orientées produit : les volumes de produits sont tels que l'existence et la configuration d'une chaîne logistique sont fortement dépendantes du produit. La conception de la chaîne logistique doit donc être optimisée dans sa globalité en interaction avec le processus de conception des produits. Elle vise à faire un équilibre entre les coûts/délais de production et de distribution, la sensibilité aux différentes perturbations évoquées et la diversité technique des produits.

## 4. Intégration dimensionnement chaîne logistique et conception produit

Dans cette section, nous expliquons le positionnement de nos travaux de développement de méthodes et d'outils d'aide à la conception de produits et de chaînes logistiques.

Pour maîtriser le cycle de vie des produits, le concurrent engineering est de plus en plus adopté par les entreprises [Prasad, 1996]. Cette approche propose d'intégrer l'ensemble des activités du cycle de vie d'un produit dès la conception. Elle englobe de façon décloisonnée toutes les activités, allant de la conception de produit à sa livraison finale, voire à son retrait.

L'activité de conception, comme processus, est définie comme un ensemble de phases durant lesquelles le produit est élaboré progressivement [Pahl et Beitz, 1996]. Ces phases vont de l'identification du besoin client jusqu'aux spécifications détaillées. Cette décomposition s'adresse aussi bien à la conception routinière, contexte de nos travaux, qu'à la conception innovante. Pour notre part, nous nous intéressons aux phases de préconception de produits dans un objectif de construction de plusieurs solutions réalisables, d'évaluation et de choix de meilleures solutions. Le critère le plus utilisé pour évaluer les différentes solutions de préconception est le coût total de production. Ensuite, les produits correspondant à ces solutions feront l'objet d'une conception détaillée que nous n'abordons pas dans le cadre de nos travaux.

La maîtrise du coût total implique la réduction des coûts logistiques. Or, si nous considérons une chaîne logistique orientée produit, ceux-ci dépendent fortement de la configuration du réseau

logistique et de sa capacité à produire ou à distribuer les quantités de produits demandées. La satisfaction de la demande nécessite alors une planification de toute la chaîne logistique. Les décisions de planification de la chaîne logistique dépendent de l'horizon de planification. Pour notre part, nous considérons les décisions stratégiques et tactiques qui correspondent au dimensionnement du réseau logistique. Par contre, les décisions tactiques et opérationnelles correspondant à la conception détaillée des moyens de production et de distribution ne seront pas abordées dans ces travaux.

La mise en place d'une démarche de concurrent engineering consiste à rompre avec la structure séquentielle linéaire en organisant un chevauchement de phases. Cette démarche doit également s'attacher davantage à décrire les interactions entre les différentes tâches de conception. La Figure I.2 représente un schéma d'organisation séquentielle des tâches de conception de produits et de conception de chaînes logistiques.

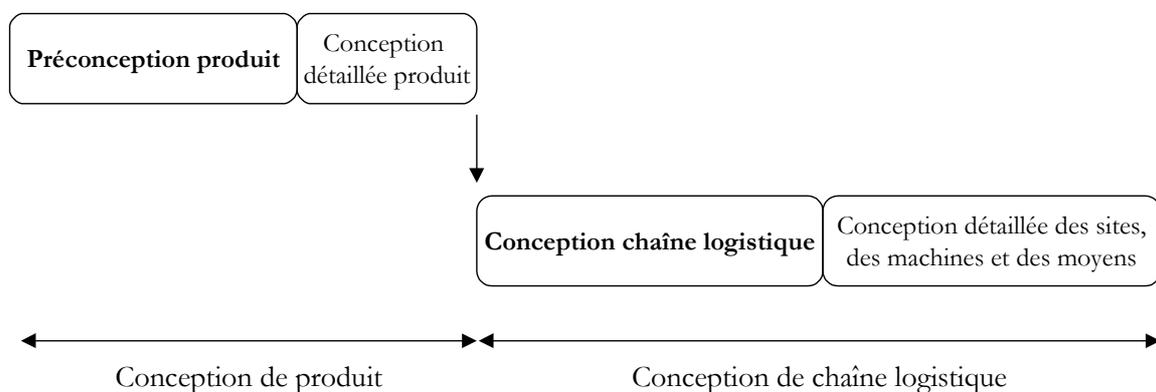


Figure I.2 – Conception produit/chaîne logistique : organisation séquentielle

Notre démarche de concurrent engineering ne remet pas seulement en cause le schéma d'organisation séquentielle, mais également le cloisonnement entre les tâches. Nous proposons de faire chevaucher le processus de conception de produit et le processus de conception de chaîne logistique. La Figure I.3 schématise le processus de conception de produits et de chaînes logistiques que nous considérons : avant de concevoir en détail les produits, la structure du réseau logistique doit être définie.

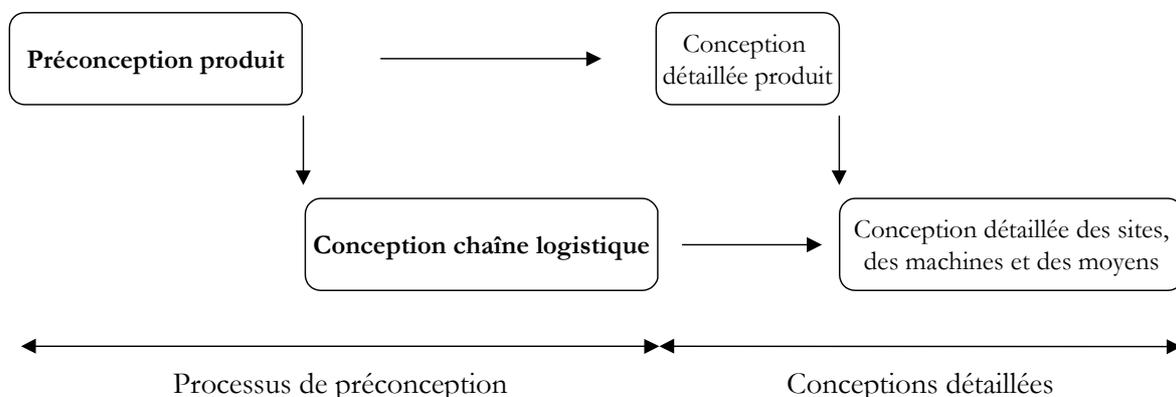


Figure I.3 – Intégration conception de produits et de chaînes logistiques

Le concurrent engineering implique la participation des différentes fonctions de l'entreprise aux processus de conception de produits et de chaînes logistiques. Lorsqu'il est question de remonter en amont les métiers de l'aval, nous comprenons qu'il s'agit de la prise en compte, dès la phase de préconception de produits, des connaissances et des contraintes de fabrication, d'assemblage et de distribution. Cela permet de réduire le nombre de modifications susceptibles d'engendrer un nombre important d'itérations.

Nous nous intéressons à la partie planification stratégique des processus de production et de distribution des produits dans un contexte d'implantation multi-sites. En effet, l'élaboration d'un plan stratégique à long terme est équivalente à dimensionner le réseau logistique approprié aux produits préconçus.

Rappelons que nous avons expliqué que d'une part, l'analyse des décisions successives résultant de la planification stratégique permet d'évaluer, d'orienter et de modifier les choix de préconception de produits et que d'autre part, les choix de préconception de produits permettent de guider le processus de dimensionnement de la chaîne logistique. Cette dépendance entre les deux processus de préconception de produits et de dimensionnement de réseau logistique exige leur coordination. Nous préconisons, en conséquence, une organisation itérative des processus de préconception de produit et de dimensionnement de réseau logistique (Figure I.4).

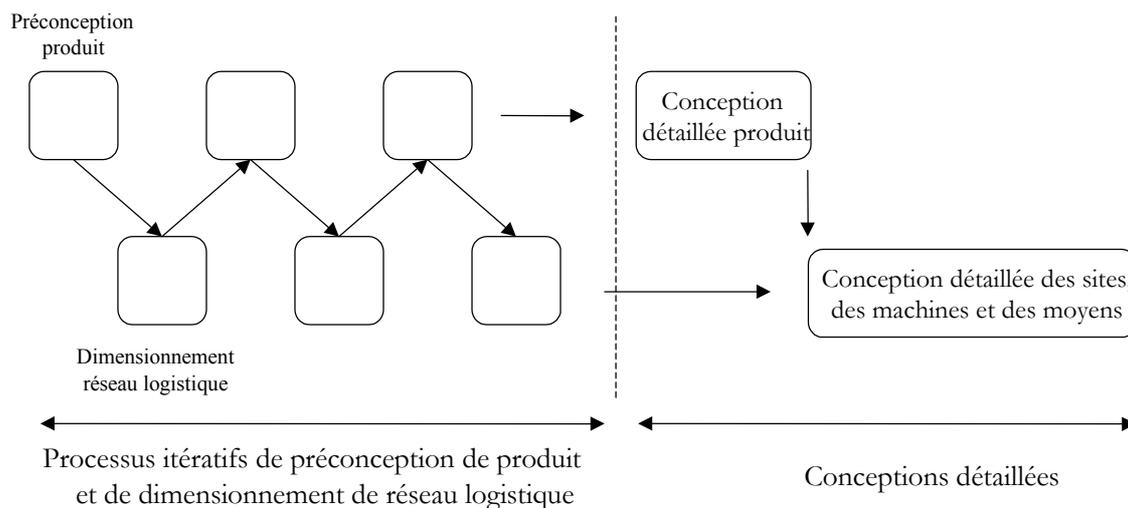


Figure I.4 – Processus successifs de préconception de produit et de réseau logistique

Le caractère itératif des processus de préconception permet alors de schématiser le chevauchement des deux activités de préconception, comme cela est représenté dans la partie gauche de la Figure I.5. Le même principe d'organisation doit pouvoir s'appliquer aux processus de conception détaillée de produit et des installations du réseau logistique, mais ne sera pas abordé dans ce travail.

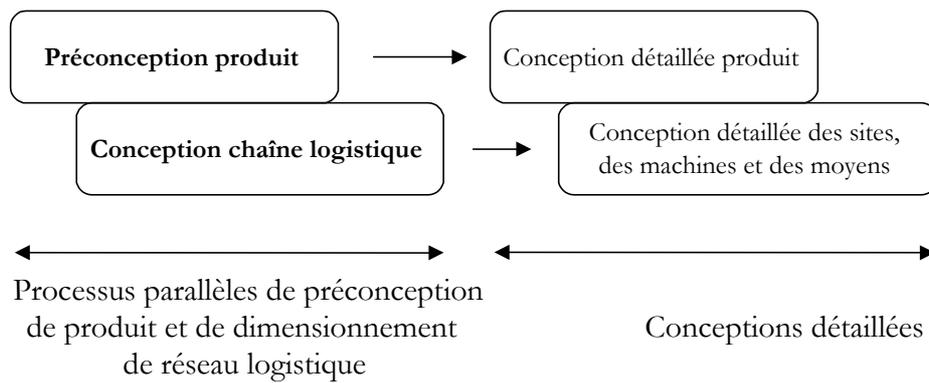


Figure I.5 – Intégration processus de conception produit/chaîne logistique

## 5. Terrain spécifique d'application

Ces travaux sont soutenus par une problématique industrielle de conception de câblage électrique pour l'automobile (systèmes de distribution électrique) et de dimensionnement du réseau logistique afférent. Dans ce qui suit, nous présentons les différentes caractéristiques du câblage automobile et de son réseau logistique.

Les câblages pour l'automobile sont définis en réponse à un besoin client très diversifié. Ce sont des produits personnalisables qui répondent aux besoins hétérogènes et individuels des clients et qui peuvent faire l'objet d'actualisation et de reconception. Ceci implique que l'entreprise conçoive plusieurs variantes du câblage, donc une famille de câblages. La structure de chaque variante est définie par une nomenclature de composants élémentaires pouvant être standard ou paramétrables. Toutefois, deux variantes du câblage ayant la même nomenclature peuvent être différenciées par l'agencement des composants de la nomenclature. Il est alors important de prendre en compte l'agencement et le positionnement des différents composants dans l'espace.

Les différents choix à effectuer pendant le processus de préconception sont restreints par une multitude de contraintes à satisfaire. Les contraintes peuvent être fonctionnelles, physiques ou géométriques. D'autres contraintes, relatives aux différentes phases du cycle de vie du produit, peuvent intervenir dans la phase de conception, telles que les contraintes de production, d'assemblage et de distribution.

Les variantes d'une famille de câblages peuvent être décomposées en modules physiques et/ou fonctionnels. Un module peut être standardisé par suréquipement pour diminuer la diversité technique et gérer ainsi moins de références de modules en production, en stockage et en distribution. La fabrication des modules de câblage peut être éventuellement délocalisée. Dans ce cas, il est possible de choisir la localisation des sites de fabrication des modules pour bénéficier par exemple de faibles coûts de production. Sur ces sites à l'étranger, la production des modules se fait sur stock. À l'inverse, les sites dédiés à l'assemblage final des modules sont localisés à proximité des lignes d'assemblage du constructeur automobile client pour assurer une livraison synchrone.

D'autres produits industriels peuvent correspondre à ces caractéristiques. En général, ce sont des produits industriels de grande consommation (volumes importants) qui supportent une forte diversité du besoin et un cycle de renouvellement des produits rapide. Nous pouvons citer par exemple les calculateurs et imprimantes, les appareils électroménagers, les matériels vidéo ou encore les téléphones portables.

## 6. Plan de lecture

L'apport de ce mémoire est d'aider aux processus de préconception de produit et de chaîne logistique lorsque la demande présente une diversité élevée. Il se décompose en deux parties (voir plan de lecture : Figure I.6) :

- Partie 1. Nous proposons dans le Chapitre 1 une démarche de conception d'une famille de produits intégrant la prise en compte d'une forte diversité du besoin client. Ce chapitre est divisé en deux sections. La première est une synthèse bibliographique sur l'activité et le processus de conception. La seconde décrit la démarche de conception que nous proposons. Celle-ci fait ressortir des besoins particuliers en outils d'assistance à la conception. Dans le Chapitre 2, une première section documente l'état de l'art sur l'ingénierie des connaissances en conception. Une seconde section traite les besoins d'aide liés à la conception du câblage électrique pour l'automobile puis propose des outils d'assistance exploitant des modèles génériques à base de contraintes.
- Partie 2. Nous considérons que la préconception de produits à forte diversité est capable de proposer de multiples solutions parmi lesquelles un choix devra être effectué pour couvrir au mieux la demande et limiter les coûts. Ces derniers étant liés au dimensionnement de la chaîne logistique, nous proposons de conduire simultanément le choix des références produit et celui du dimensionnement de la chaîne logistique. La définition de cette problématique est présentée en détail dans le Chapitre 3. Le Chapitre 4 propose une synthèse bibliographique sur les problématiques et modèles de dimensionnement de réseaux logistiques. Le Chapitre 5 expose ensuite, en détail, notre modèle de choix simultané de solution produit et de dimensionnement d'une chaîne logistique. C'est un programme linéaire mixte en nombres entiers minimisant le coût total de fonctionnement de la chaîne logistique sous diverses contraintes, particulièrement de nomenclatures de produits. Enfin, le Chapitre 6 met en œuvre notre modèle d'optimisation sur un cas d'étude lié au câblage électrique pour l'automobile.

Ces travaux sont issus d'une problématique industrielle de conception de système de câblage pour l'automobile. Situés entre conception de produit et dimensionnement de chaîne logistique, ces travaux se placent fondamentalement dans le domaine du Concurrent Engineering.

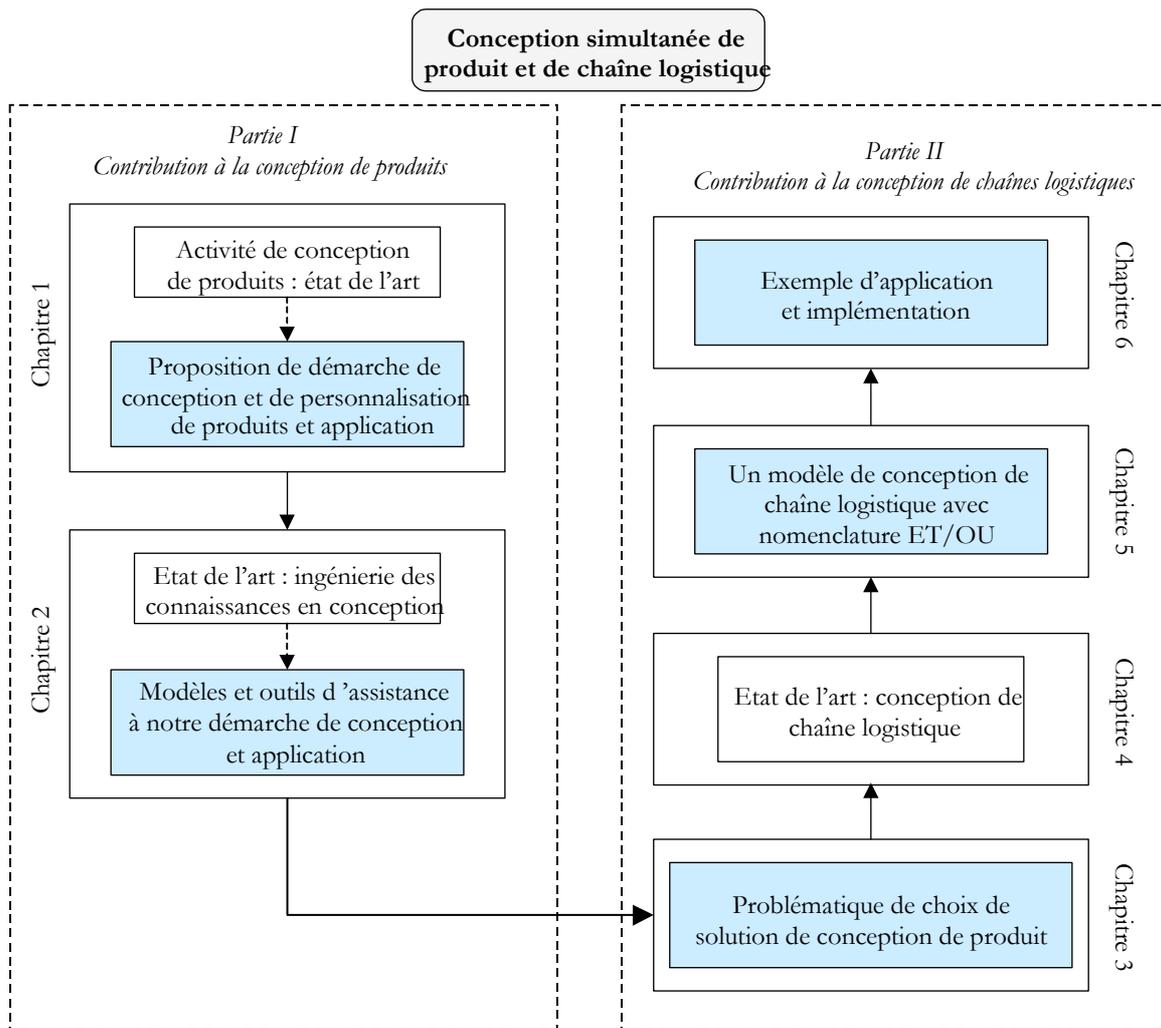


Figure I.6 – Plan de lecture du manuscrit



# **Partie I**

## **Contribution à l'aide à la conception de produits**



# Chapitre 1. Une démarche de conception de produits à forte diversité

## 1.1. Introduction et objectifs

L'activité de conception est une étape déterminante et décisive dans le cycle de vie d'un produit. Elle en constitue la phase initiale, durant laquelle toutes les spécifications du produit vont être définies de façon à satisfaire toutes les fonctionnalités et les performances exprimées dans le cahier des charges. Habituellement, la première étape du processus de conception d'un produit consiste, à partir d'un cahier des charges, à générer un ensemble de solutions de conception qui paraissent a priori satisfaisantes. Cette étape est celle de la préconception. Ces solutions de préconception sont généralement caractérisées par des schémas de principe [Pahl et Beitz, 1996]. Sur la base d'un ou plusieurs critères, le concepteur évalue chaque solution. La ou les meilleures solutions retenues sont ensuite étudiées finement dans la phase de conception détaillée.

L'objectif principal de cette étude est de proposer une démarche de préconception de produits capable de prendre en compte la diversité de la demande et du besoin client sans pour autant générer une grande diversité des processus de fabrication et logistique. Cette démarche s'appuie essentiellement sur l'exploitation et la réutilisation des connaissances relatives aux conceptions antérieures. Nous montrons, à travers l'application industrielle, comment l'approche de préconception que nous préconisons permet de structurer, manipuler et vérifier toutes les connaissances relatives aux différents points de vue du produit (fonctionnel, physique et géométrique) en cours de préconception.

Pour présenter notre contribution à l'activité d'aide à la conception, et particulièrement la préconception de produits à forte diversité, nous avons décomposé ce chapitre en deux grandes parties.

La première partie (1.2) 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 situer le contexte de notre étude. Nous concluons cette partie par la description du terrain spécifique à notre étude.

A travers la seconde partie (1.3), qui constitue notre première contribution, nous exposons en détail notre approche d'aide à la préconception de produits à forte diversité et en particulier le processus de préconception du système de distribution électrique pour l'automobile.

Enfin, une conclusion fera ressortir les besoins d'assistance à la démarche de conception que nous proposons.

## 1.2. Activité de conception de produits : état de l'art

### 1.2.1. Introduction

L'objectif principal de cette partie est de dresser un état de l'art en matière de conception de produits et en particulier des produits à forte diversité. Pour cela, nous divisons cette partie en six sections. Dans chacune de ces sections, nous abordons un aspect particulier de l'activité de conception et nous situons, à chaque fois, le contexte de notre étude.

La première section (1.2.2) propose quelques définitions et caractéristiques génériques de l'activité et du processus de conception de produits industriels. Ensuite, s'appuyant sur ces définitions, une décomposition du processus de conception en un ensemble de phases est présentée dans la section (1.2.3). Nous abordons dans la section (1.2.4) une typologie des problèmes de conception. Elle s'appuie principalement sur l'existence ou non des phases de conception et la nature des connaissances disponibles. La section suivante (1.2.5) s'interroge sur les éléments d'amélioration du déroulement d'un processus routinier de conception par des approches de type concurrent engineering. Enfin, la dernière section (1.2.6) traite des problématiques liées à la diversité des produits.

### 1.2.2. Activité et processus de conception

Fondamentalement, la conception est considérée comme une activité intellectuelle et cognitive très complexe [Dixon, 1988]. C'est une tâche généralement longue à l'issue de laquelle une solution produit s'avère rarement inédite. Le déroulement d'un processus de conception fait intervenir en permanence plusieurs processus de raisonnement qui utilisent plusieurs sources de connaissances [Brown, 1998a].

Dans le domaine mécanique, l'activité de conception peut être définie comme un processus de création et de définition d'une ou plusieurs descriptions d'un produit. Ces descriptions sont identifiées en réponse à un ensemble de besoins et d'exigences et elles doivent en outre satisfaire un ensemble de contraintes. Les contraintes proviennent de plusieurs sources. Elles peuvent être imposées par le problème, par le concepteur, par le fabricant, par l'utilisateur ou par des lois naturelles. En effet, elles traduisent les fonctions que doit remplir le produit, les ressources disponibles, les limitations physiques, les contraintes de fabrication, les critères de conception, et enfin la manière de concevoir.

La tâche du concepteur consiste à transformer un besoin client, exprimé en termes de fonctions, en une description détaillée du produit. Cette description finale du produit est généralement représentée sous des formes graphiques, numériques ou simplement textuelles [Gero, 2001]. Elle doit être suffisamment complète, cohérente et explicite pour que les produits conçus soient techniquement réalisables, c'est-à-dire qu'ils puissent être ainsi fabriqués, assemblés et distribués.

[Chandrasekaran, 1990] propose une définition générale : "un problème de conception est spécifié par (i) un ensemble de fonctions (exigées par le client et le consommateur du produit ou définies implicitement par le domaine) que doit remplir le produit et un ensemble de contraintes à satisfaire, (ii) un ensemble de composants prédéfinis et un ensemble de relations entre ces différents composants. Les contraintes peuvent porter sur les paramètres de définition du produit, sur le processus de réalisation du produit ou sur le processus de conception. La solution d'un problème de conception est définie par une spécification complète d'un ensemble de composants et de leurs relations. Cette spécification permet de décrire le produit remplissant les fonctions et respectant les contraintes. Cette solution est calculée de manière à optimiser ou à satisfaire un ensemble de critères".

Par la définition précédente, nous soulignons le caractère générique de l'activité de conception, non spécifique à un domaine particulier.

Mais, pour certaines situations de conception, cette définition trouve vite ses limites. En effet, initialement, les listes de fonctions, de composants et de contraintes ne sont pas complètes. Des fonctions, des composants ou des contraintes supplémentaires doivent être définis durant le processus de conception. Certaines fonctions, composants ou contraintes doivent être modifiés ou relâchés au fur et à mesure de l'avancement du processus de conception.

Pour [Guéna, 1992], qui propose la même définition, les deux situations précédentes ne posent aucun problème particulier. L'auteur considère que la conception est un problème récursif. En effet, dans le cas où, par exemple, des composants ne figureraient pas dans la liste prédéfinie, l'auteur préconise de concevoir ces nouveaux composants au besoin.

### 1.2.3. Les phases du processus de conception

Comme nous l'avons souligné plus haut, l'activité de conception est considérée comme un processus. Il peut se décrire comme une suite de phases fortement liées entre elles par des relations et contraintes diverses. Le client exprime souvent son besoin et ses exigences sous la forme d'un cahier des charges qui traduit les différentes fonctionnalités et performances que doit remplir le produit final. Le concepteur transforme progressivement ce besoin en un produit techniquement réalisable à travers un certain nombre de phases. Le déroulement de ces phases caractérise l'évolution dans le temps des différentes représentations du produit. Dans ce même sens, [Gero, 1989] définit l'activité de conception comme un processus permettant d'aboutir à une "forme" à partir d'une description sans forme.

Beaucoup d'auteurs ont proposé des décompositions du processus de conception en plusieurs phases. Le nombre de phases et leurs descriptions diffèrent selon le type de produit, le niveau de spécification, les besoins, les connaissances disponibles ou encore selon les domaines de conception.

[Pahl et Beitz, 1996] proposent un ensemble exhaustif de tâches génériques de conception. Cet ensemble est décomposé en quatre grandes phases, communément adoptées par l'ensemble des communautés scientifique et industrielle (Figure 1.1) :

- élaboration du cahier de charges (planning and clarifying the task),
- formalisation et spécification des principes (conceptual design),
- conception d'ensemble (embodiment design),
- conception détaillée (detail design).

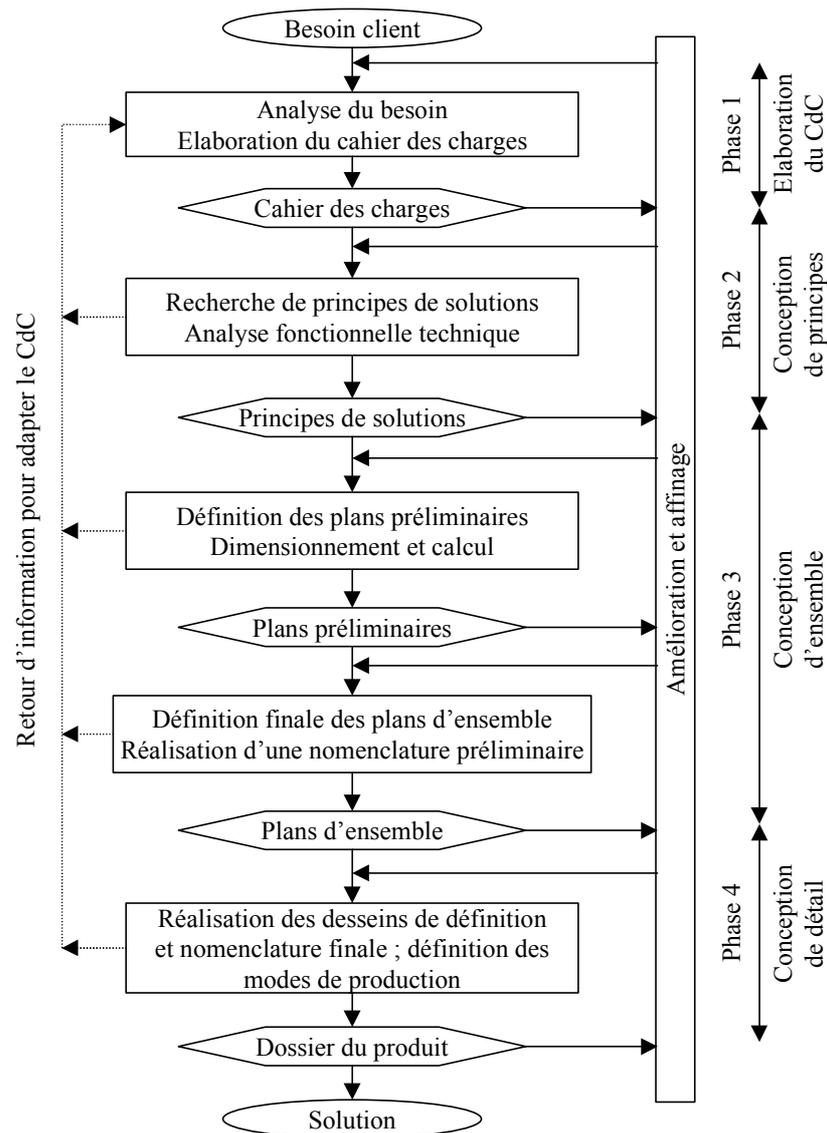


Figure 1.1 – Phases du processus de conception [Pahl et Beitz, 1996]

Les aspects itératifs et dynamiques du processus de conception montrent que le déroulement des différentes phases n'est pas totalement séquentiel [Pahl et Beitz, 1996] [Brown, 1998a]. La conception est une activité fortement itérative. Par exemple, pendant une phase avancée du processus de conception, une simple modification du besoin client peut remettre en cause certains choix et calculs déjà validés pendant la phase de spécification des principes.

### 1.2.3.1. Elaboration du cahier de charges

La phase d'élaboration du cahier de charges représente la phase initiale du processus de développement d'un produit. Durant cette phase, dite aussi phase fonctionnelle [Dixon *et al.*, 1988], la tâche du concepteur consiste d'une part, à récolter et analyser les besoins des clients ou du marché et d'une autre part, à identifier les capacités de l'entreprise pour y répondre à travers une proposition produit. Le résultat final 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 coût et délai de mise sur le marché. Cette

phase correspond aux deux phases "identification du besoin" et "génération des spécifications" proposées par [Chandrasekaran, 1990] dans le cadre d'un processus de reconception.

### **1.2.3.2. Spécification des principes**

Cette étape permet d'affiner et de corriger le contenu de la première phase, ce qui correspond à structurer, hiérarchiser et caractériser les différents besoins fonctionnels exprimés. Durant cette phase conceptuelle, le concepteur va rechercher et évaluer des principes physiques envisageables et des pistes de solutions qui correspondent aux besoins fonctionnels identifiés auparavant. Ces principes de solutions correspondent, le plus souvent, à un ensemble de fonctions techniques ou à des schémas et concepts techniques.

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.

Dans le cas de processus de reconception, cette phase correspond à la phase "génération des concepts" proposée par [Chandrasekaran, 1990].

### **1.2.3.3. Conception d'ensemble**

Durant cette phase, les concepts associés au produit sont développés par la définition de la description technique complète et la structure finale du produit. Le concepteur élabore la structure physique du produit par le choix, le dimensionnement et l'agencement d'un ensemble de composants. La solution produit se raffine concrètement par des représentations et des vues géométriques d'ensemble de plus en plus évoluées, par une nomenclature de composants et par une évaluation des coûts.

Les concepteurs évaluent souvent plusieurs solutions possibles de structure et d'agencement (architectures) parmi lesquelles sera choisie la plus satisfaisante, suivant des critères économiques et techniques. Enfin, cette variante fera l'objet d'une conception détaillée.

Cette phase est équivalente aux phases "analyse" et "évaluation" des solutions de reconception de produits décrites par [Chandrasekaran, 1990].

### **1.2.3.4. Conception détaillée**

Elle représente la phase finale du processus de conception. Le concepteur définit complètement et en détail chaque composant sélectionné et validé 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, distribution).

Au terme de cette phase, le produit est entièrement décrit de telle sorte que les informations générées puissent être exploitées par tous les acteurs. Sa définition finale comprend toutes les informations relatives au produit (schémas d'ensemble, plans des composants et pièces, nomenclature détaillée, agencement des composants et évaluation économique) et celles qui décrivent ses modes d'industrialisation (technologie de fabrication, gammes et outils).

[Chandrasekaran, 1990] propose également la conception détaillée comme phase finale du processus.

Au terme de tout processus de conception, il est souvent question d'une phase de vérification et validation des résultats. Elle permet en effet de vérifier si le produit répond bien aux spécifications du cahier de charges. Cette phase se traduit souvent par la réalisation d'un prototype physique [Gero, 2001]. Il est utilisé pour valider la solution avec le client et éventuellement réaliser certains essais. Néanmoins, cette pratique tend à disparaître du fait des coûts et des délais qu'elle engendre. Avec le développement de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de la simulation numérique, le maquettage physique est remplacé par le maquettage numérique.

## **Bilan et positionnement**

Selon [Brown, 1998a], le point de départ de l'activité de conception peut être n'importe quel niveau d'abstraction du produit et le point final peut être n'importe quel niveau de spécification du produit. La complexité et la durée du processus de conception dépendent de l'écart entre les deux niveaux d'abstraction et de spécification. Ainsi, un processus complet de conception, où toutes les phases détaillées précédemment sont à développer, représente le cas extrême.

Les problèmes de conception sont souvent classifiés suivant la présence ou non d'une ou plusieurs des phases décrites précédemment.

Bien que cette décomposition résulte principalement des différents travaux menés sur des processus de conception issus de l'ingénierie mécanique, elle reste de mise pour décrire les processus de conception dans d'autres domaines, en particulier le nôtre, traitant de la conception du système de distribution électrique.

Dans le cadre de notre étude, nous n'allons pas spécifier toutes les phases du processus de conception. Nous nous intéressons particulièrement à ce que nous appelons le processus de préconception qui regroupe les trois premières phases pour traiter à la fois la diversité fonctionnelle et la diversité technique.

### **1.2.4. Classification de types de conception**

Dans la plupart des travaux menés sur le thème de la conception de produits, les auteurs ont proposé une typologie des problèmes de conception [Chandrasekaran, 1990].

Une classification retenue par beaucoup d'auteurs et générique à la plupart des domaines d'application de la conception fait ressortir deux grandes classes :

- la conception prédéfinie (routinière), et
- la conception nouvelle (non routinière).

La conception nouvelle se décompose en deux grandes sous-classes :

- la conception innovante, et
- la conception créative.

Cette typologie est adoptée par beaucoup d'auteurs parce qu'elle met en avant le degré de complétude de la connaissance relative au produit et au processus de conception. La Figure 1.2 montre ces types de conception avec les types de produits associés.

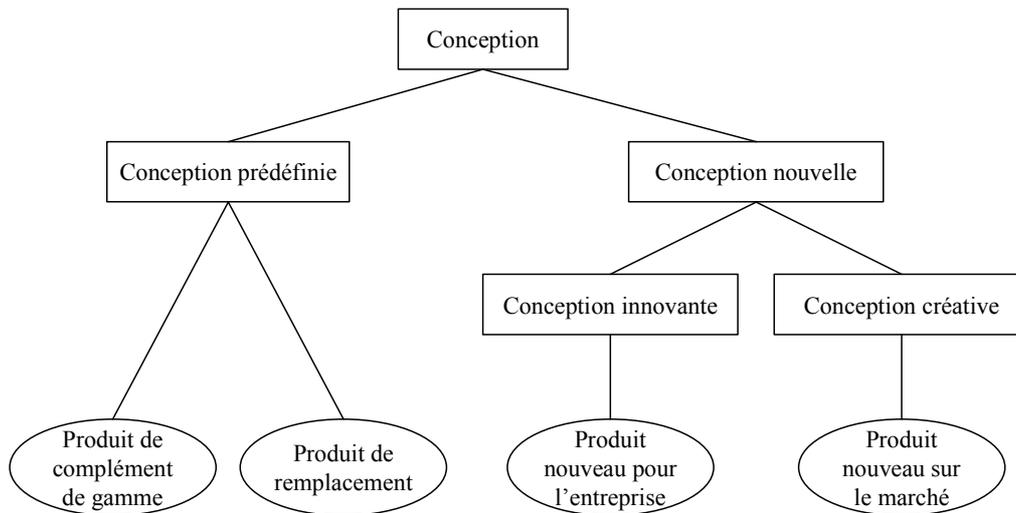


Figure 1.2 – Types de conception et nature de produits

#### 1.2.4.1. Conception routinière ou prédéfinie

Toutes les connaissances à mettre en œuvre sont totalement disponibles et identifiées. De plus, les stratégies de conception sont globalement connues à l'avance par le concepteur. Dans ce cas, le rôle du concepteur consiste à justifier ses choix, à retenir ou non telle ou telle solution, et dans d'autres cas, à améliorer ou à modifier des solutions antérieures qui vérifient un ensemble de contraintes prédéfinies. La conception routinière ne permet qu'une instanciation ou modification des valeurs des paramètres qui caractérisent le produit. La conception routinière, appelée également reconception, représente environ 80 % des activités de conception mécanique [Vargas, 1995] [Sellini, 1999].

Dans ce cadre, bien que le concepteur connaisse l'espace des solutions potentielles (les caractéristiques et les attributs à instancier sont connus à l'avance), la recherche d'une solution spécifique peut s'avérer complexe et coûteuse du fait de la taille de l'espace des solutions ou du fait de la difficulté de mesurer les conséquences d'un choix ou d'une modification. La représentation de la Figure 1.3 proposée par [Gero, 2001] montre graphiquement l'espace des conceptions routinières par rapport à l'espace de toutes les solutions possibles.

#### 1.2.4.2. Conception innovante

La conception innovante porte sur un produit connu. L'expression du besoin, les technologies à utiliser sont souvent connues à l'avance et sont clairement définies mais les stratégies de conception restent à identifier. La connaissance d'une innovation sur un produit correspond généralement à un besoin non encore satisfait exprimé par des clients.

Durant un projet d'innovation, le concepteur possède plus d'autonomie d'intervention et un espace de recherche de solutions plus large (Figure 1.3). Mais pour explorer cet espace, les concepteurs s'engagent dans une activité importante de recherche et de développement avec tous les risques que cela suppose. Le résultat d'une conception innovante est un produit familier à l'utilisateur mais avec un aspect nouveau résultant des nouvelles valeurs des attributs et des caractéristiques [Gero, 2001].

### 1.2.4.3. Conception créative

La conception créative porte sur un produit inconnu. Elle intervient quand il n'existe aucune solution produit a priori et que toutes les connaissances relatives au produit et au processus de conception sont à spécifier. Le concepteur prend en charge également la réalisation du cahier des charges. Il intervient dans la définition des nouvelles fonctions et des nouveaux paramètres du nouveau produit. Les projets de conception créative favorisent l'émergence de nouvelles idées et de nouvelles technologies. Par conséquent, la création de nouveaux produits nécessite beaucoup d'intuition et d'imagination. Néanmoins, l'espace de recherche des solutions n'est pas très contraint. C'est un prolongement de l'espace des solutions potentielles en relâchant par exemple certaines contraintes (Figure 1.3) [Gero, 2001].

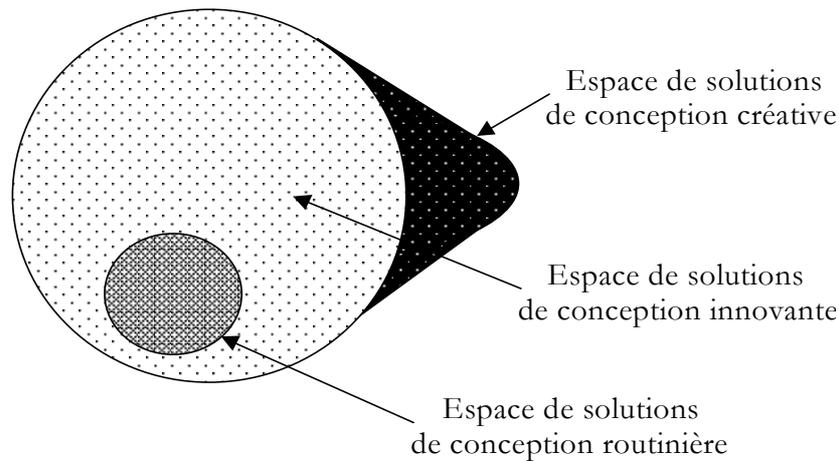


Figure 1.3 – Espace des solutions de conception routinière, innovante et créative [Gero, 2001]

Pour illustrer l'intégration de ces différentes classes de problèmes de conception selon le niveau de connaissances disponibles, [Kota et Ward, 1991] proposent un schéma global de conception (Figure 1.4). Un processus de conception créatif devient innovant lorsque les fonctions du produit ont été définies et ce processus devient routinier lorsque les choix de principes technologiques ont été effectués [Kota et Ward, 1991].

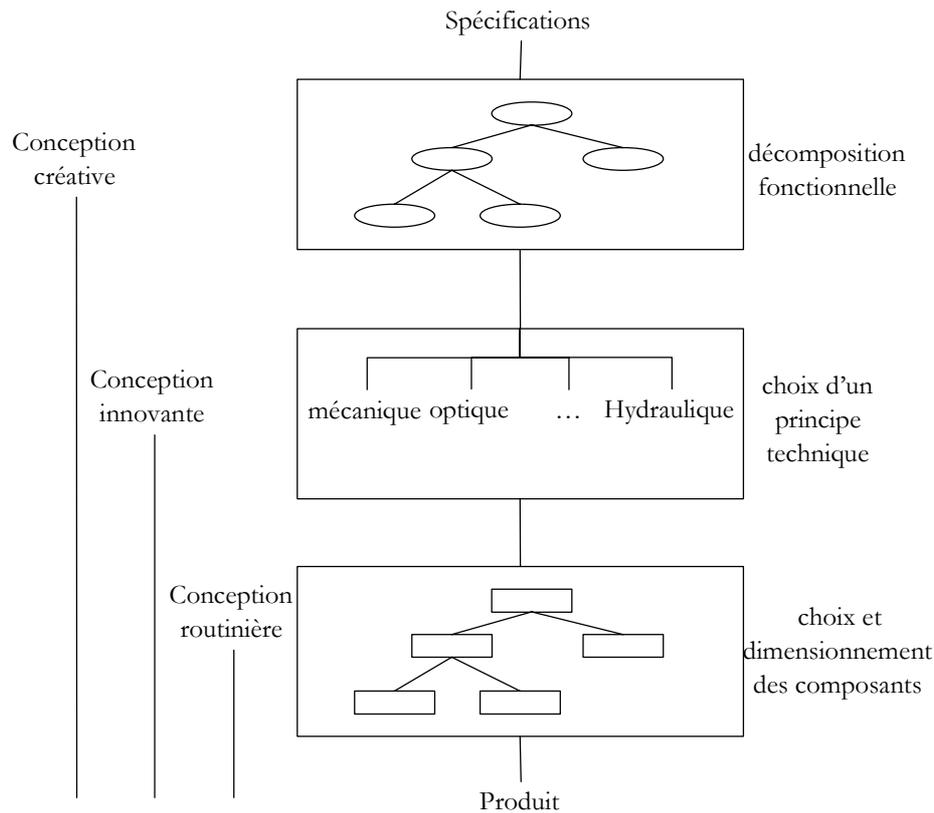


Figure 1.4 – Schéma global de conception [Kota et Ward, 1991]

D'autres typologies moins partagées existent également dans la littérature. Dans leur approche systématique de conception, [Pahl et Beitz, 1996] ont développé une typologie selon le contexte de conception. La conception nouvelle correspond à des tâches de conception pour lesquelles de nouveaux principes sont recherchés et de nouvelles solutions sont développées. La conception adaptée exploite les principes et les solutions déjà établis et l'effort de conception consiste à adapter ces principes et solutions aux nouvelles contraintes et aux nouveaux besoins spécifiques. La conception par variantes consiste, à partir d'une conception existante, à définir un produit par de simples variations des dimensions ou des agencements des composants. [Brown, 1998a] [Dixon, 1988] proposent des typologies plus détaillées des problèmes de conception. En effet, ils considèrent certaines phases du processus comme des classes de problèmes de conception. Les différentes classes sont identifiées sur plusieurs axes : le niveau de connaissance disponible ou le niveau d'abstraction du produit et de spécification. Les auteurs parlent alors de conception préliminaire, conceptuelle, fonctionnelle, innovante, créative, routinière, d'ensemble, paramétrique, détaillée, non-routinière, de configuration et de reconception.

## Bilan et positionnement

Contrairement à la conception routinière, la complexité des processus créatifs et innovants engendre une reproductibilité très difficile [Blanco, 1999]. Par rapport à cette classification, nous nous intéressons à la conception routinière de produits. Comme nous l'avons précisé précédemment, nous ne concevons pas en détail les composants ; ils sont considérés comme prédéfinis à l'avance à l'issue de processus antérieurs de conception. Il est à noter également que, dans le contenu du cahier de charges fonctionnel du besoin, l'ensemble des fonctions que peut remplir le produit est connu. Nous ne définissons ni de nouveaux composants, ni de nouvelles fonctions. Notre processus de conception peut être également situé entre la conception adaptée

et la conception par variantes. Le processus de conception s'appuie sur la capitalisation et la réutilisation des connaissances relatives au produit pour mieux gérer la diversité du besoin. Cette capitalisation est pleinement exploitée en conception routinière et adaptative en rassemblant les principes et les solutions ayant fait leurs preuves lors de conceptions antérieures dans un modèle générique. Le modèle générique est ainsi capable de représenter une famille de produits avec toutes les variantes possibles. Assumant également qu'un produit est un assemblage de composants prédéfinis, la tâche de conception consiste à rechercher un ensemble de composants qui satisfait les besoins clients et respecte toutes les contraintes du modèle générique.

Nous avons montré précédemment que l'activité de conception s'insère dans le cycle de vie du produit et qu'elle est souvent menée en forte relation avec les autres phases du cycle de développement. Cette dépendance est mise en œuvre dans le contexte du concurrent engineering [Kusiak et Wang, 1991].

## 1.2.5. Conception intégrée et concurrent engineering

### 1.2.5.1. Définitions

Le processus traditionnel de conception est mis en œuvre par un transfert continu et séquentiel des informations allant de la spécification des besoins jusqu'à la conception détaillée. C'est en raison de ce fonctionnement séquentiel que des 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. C'est dans ce contexte d'inadéquation entre les pratiques de conception de produits selon un schéma séquentiel et les nouveaux enjeux économiques que la notion de concurrent engineering est apparue. Son activité d'application principale reste l'activité de conception de produit.

L'objectif visé par l'introduction des outils du concurrent engineering 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 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 [Prasad, 1996]. Elle doit permettre d'adopter une organisation simultanée pour paralléliser au mieux les différentes phases du processus de développement [Sohlenius, 1992] ou encore une organisation concourante pour converger vers un même objectif. Cette organisation doit donc impliquer la participation de différents acteurs représentant les différentes fonctions du cycle de vie du projet de développement.

La notion de concurrent engineering est utilisée sous d'autres appellations : "ingénierie simultanée", "ingénierie parallèle", "ingénierie concourante" et "ingénierie intégrée". Pour notre part, et tout au long de ce document, nous utilisons le terme "concurrent engineering" pour désigner les trois notions de simultanéité, de concourance et d'intégration des activités d'un projet de conception de produit.

Actuellement, la notion et les applications du concurrent engineering sont largement traitées par de nombreux ouvrages dans l'industrie et la recherche. Plusieurs définitions, plus au moins complémentaires, ont été proposées par les auteurs [Clermont, 1998] [Boudouh, 2000]. Considérant l'ensemble des définitions proposées, nous retenons une définition synthétique établie par [Clermont, 1998] sur la base des autres définitions : "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-délai-qualité". De cette définition, il résulte les principales caractéristiques du concurrent engineering :

- 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, essentiellement les méthodes de conception et de gestion de la production et de la distribution.

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 [Dowlatshahi 1992, 1994]. 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. Par conséquent, l'entreprise parvient à tenir ses engagements de satisfaction du besoin client et de diminution de ses coûts globaux.

### 1.2.5.2. Outils

Pour mesurer les apports d'introduction d'une démarche de concurrent engineering, deux grandes enquêtes ont été menées auprès de plusieurs entreprises de tailles différentes et issues de secteurs d'activités diversifiés : l'enquête réalisée par [Lawson et Karandikar, 1994] auprès d'industriels américains, et l'enquête menée par [Cerezuola *et al.*, 1998] auprès d'industriels québécois et français. Il en ressort que les principaux outils utilisés lors de projets de conception de produits reposent essentiellement sur la capitalisation et l'exploitation des connaissances accumulées dans l'entreprise. Ce sont : la conception et la fabrication assistées par ordinateur et les technologies de l'information en général, la conception pour la fabrication et l'assemblage (Design For X, X pour fabrication et assemblage), la formation d'équipes multidisciplinaires :

- Formation des équipes de travail multidisciplinaires : cela forme une organisation favorable au processus de développement de produits. Les acteurs de conception se réunissent tous, dans une même équipe, autour d'un même projet de développement de produit. Les points de vue pluriculturel et multi-métiers de ces équipes nécessitent la négociation et la confrontation des savoir et savoir-faire pour converger vers un compromis [Tichkiewitch *et al.*, 1995].
- Utilisation des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) : l'émergence et le développement des technologies de l'information et de la communication ont beaucoup favorisé l'échange et l'archivage des informations. Le volume et l'évolution des données et connaissances associées au produit pendant tout son processus de développement sont conservés, maintenus et accessibles par tous les acteurs de l'équipe projet. L'accumulation de ces différentes connaissances au fil des projets de conception constitue l'expérience et le savoir-faire de l'entreprise.
- Le Design For X (DFX) : l'ingénierie intégrée propose des approches visant à intégrer conception de produit et conception de procédé. Ces approches rentrent dans les démarches de type Conception pour X (Design For X) présentées dans [Huang, 1996]. Ainsi, la conception pour la fabrication et l'assemblage (Design For Manufacturing and Assembly ou DFMA) vise à agir sur la conception du produit dans le but de rendre sa fabrication et son assemblage les plus efficaces possibles.

## **Bilan et positionnement**

Comme nous l'avons exposé dans l'introduction de ce document, nos travaux, visant à améliorer le déroulement de l'activité de préconception de produits, s'inscrivent dans ce même contexte de concurrent engineering. En plus des objectifs de maîtrise du triplet coût-déla-quality, nous visons également une meilleure gestion de la diversité des besoins clients et des solutions de préconception par la capitalisation et la réutilisation des connaissances relatives au produit et à son processus de conception. En ce sens, nos travaux contribuent à montrer comment l'application des principes du concurrent engineering permet de traiter en parallèle plusieurs solutions de préconception par une évaluation du réseau logistique.

### **1.2.6. Conception et diversité des produits**

Dans le contexte de diversification des besoins, un client souhaite un produit personnalisé répondant à l'ensemble de ses besoins et refuse de payer des fonctions dont il n'a pas l'utilité. Les concepteurs peuvent adopter plusieurs stratégies allant de la conception d'un produit unique capable de répondre à l'ensemble des besoins et par là même à satisfaire tous les clients, à la conception de produits sur mesure répondant strictement aux besoins d'un client spécifique. Cependant, la première solution risque de générer des surcoûts de suréquipements et la seconde risque de conduire à une augmentation des coûts de production. Pour la plupart des produits industriels, les concepteurs optent pour des solutions intermédiaires. Ces solutions consistent à concevoir et à assembler à la fois des éléments standard et des éléments spécifiques. Deux types de diversité doivent être alors gérés simultanément : la diversité fonctionnelle (externe) visant la satisfaction du client et la diversité technique (interne) qui concerne plus spécifiquement la fabrication des références de produits. La solution idéale consiste à proposer des produits avec une diversité fonctionnelle maximale tout en limitant la diversité technique. Plusieurs politiques de conception de produits ont été proposées pour définir un ensemble de produits à partir d'éléments standardisés : la différenciation retardée, la conception modulaire et la standardisation.

[Lamothe et Aldanondo, 2001] synthétisent ces différentes politiques pour proposer un indicateur de performance de la chaîne logistique suivant une démarche de type Design For Supply Chain Management. Ces actions, remettant en cause la partie physique de la chaîne logistique (produit, procédé et implantation), permettent de mieux réagir aux fluctuations de la demande et d'améliorer ainsi l'indicateur proposé.

[Agard, 2002] [Agard et Tollenaere, 2002 a et b] ont développé un outil d'aide à la conception de modules industriels (pour les faisceaux électriques automobiles) permettant d'assurer une diversité fonctionnelle totale des produits finis, en s'appuyant à la fois sur la description du produit et des procédés. Un compromis est alors recherché entre le nombre de modules à réaliser et les coûts de production pour l'assemblage final des produits sous une contrainte de temps d'assemblage final liée à une livraison synchrone.

#### **1.2.6.1. La différenciation retardée**

La différenciation retardée consiste à retarder le point de différenciation des produits ou des processus de manière à stocker des produits semi-finis plutôt que des produits finis [Lee et Tang, 1998]. Le point de différenciation est le point à partir duquel chaque produit acquiert sa propre identité. L'objectif principal est de fournir un maximum de modules standard et de repousser le plus en aval possible le point de différenciation des produits.

L'objet de la différenciation retardée du produit par action sur les procédés est de modifier l'ordre des phases du mode opératoire pour repousser les opérations générant de la diversité vers la fin

du processus. [Lee et Tang, 1998] présentent deux exemples. Dans le premier cas, l'opération qui cause la différenciation est repoussée à la fin du processus ; c'est au moment de la distribution que s'effectue la différenciation par l'assemblage des éléments nécessaires. Le second exemple traite de l'inversion dans l'ordre de réalisation de deux opérations. La diversité se produisant plus tard dans le processus, le délai de livraison durant lequel la demande fluctue peut être plus petit. De ce fait, la chaîne logistique est moins sensible aux fluctuations. De plus, cette réduction de délai fournit un levier pour la mise en flux tendu des opérations retardées. Enfin, l'inversion a pour effet de réduire la diversité des composants des opérations avancées, d'où des gains équivalents à une standardisation de composants.

En considérant le processus de transformation de matière, la différenciation retardée géographique vise à déplacer physiquement un processus à forte différenciation sur des sites plus proches de la demande et consiste donc à permuter un processus de transformation de matière avec un processus de stockage et transport [Lee *et al.*, 1993] [Lee et Billington, 1994]. De manière duale, les opérations générant une faible diversité peuvent être rassemblées sur un nombre limité de sites afin de réaliser des économies d'échelle et des gains de productivité. Cette action corrective pousse ainsi à situer les processus à forte diversité au plus près des clients et à conserver les processus à faible diversité sur des sites à haute productivité et faible coût de fonctionnement. La proximité de la demande des installations de fin de chaîne permettra d'améliorer le taux de service mais dégradera la composante coût. Les décisions concernant cette forme de localisation des procédés sont très délicates car liées à la fiabilité géographique de la demande, à la disponibilité des transports et à la stabilité des pays à coûts de production modérés.

### 1.2.6.2. La conception modulaire

La conception modulaire consiste à partager des éléments (composants, modules) entre différentes fonctions et/ou différents produits finis [Subbu *et al.*, 1999]. Ceci nécessite pour le module d'avoir des surcapacités fonctionnelles. L'interchangeabilité suppose de standardiser non pas le module mais les interfaces entre modules et les types de fonctions ou, plus généralement, les objectifs de chaque module. Par la suite, un module pourra avoir différentes références correspondant à des performances différentes pour les objectifs recherchés. [Erixon, 1996] et [Van Hoek et Weken, 1998] soulignent les retombées de la modularisation des produits. Tout produit est obtenu en faisant un assemblage des modules au besoin. Le but de la conception modulaire est alors d'augmenter le nombre de cas d'emploi, afin d'utiliser des modules communs dans différents produits, et de permettre de réaliser un grand nombre de produits finis différents à partir d'un nombre limité de composants modulaires. Elle consiste à définir les modules, de telle sorte que leurs caractéristiques et leur nombre permettent de satisfaire une variété d'usages donnée en minimisant la somme des coûts engendrés par leur conception (coût de surcapacités fonctionnelles) et leur production (coûts liés à la variété) [Tarondeau, 1998]. La modularisation vise donc à complètement reconcevoir un ensemble de produits pour structurer des modules communs. [Huang et Kusiak, 1998] ont travaillé sur la conception modulaire dans le but de produire une large variété de produits à faibles coûts. Ils ont utilisé une représentation matricielle pour modéliser les relations entre les composants du produit et les fonctions qu'ils réalisent. Ensuite, une approche par décomposition matricielle est utilisée pour extraire les éléments interchangeables et standardisés. [Jiao et Tseng, 1999] ont fourni une méthodologie pour développer une architecture de famille de produits afin de rationaliser la conception de produits pour la personnalisation de masse à partir des points de vue fonctionnel, technique et physique. Plusieurs exemples d'application de la conception modulaire peuvent être trouvés dans [Kusiak, 1999].

La réduction de la diversité par la modularisation a des impacts multiples sur la chaîne logistique [Lamothe et Aldanondo, 2001]. La demande sur les produits finis va se répercuter sur les

modules. Les modules étant communs, les variations des demandes sur les produits finis peuvent se compenser et rendre la chaîne logistique moins sensible aux fluctuations de demande. Il est également possible d'avoir des niveaux de stock par module plus importants et d'être moins vulnérable aux ruptures. Ceci améliore le taux de service. Enfin, l'indépendance des modules facilite le recours à la sous-traitance permettant ainsi de réduire les commandes en retard. Cette indépendance autorise aussi une spécialisation des moyens par module qui permet des gains de productivité et de flexibilité.

### 1.2.6.3. La standardisation

Les produits étant modularisés, il est encore possible de réduire la diversité en standardisant les modules. La standardisation consiste à utiliser des éléments ou des procédés de fabrication communs à un maximum de produits. Elle s'effectue en standardisant les composants des modules et/ou en suréquippant les modules.

La standardisation des composants [Huang, 1996] est une approche assez ancienne qui correspond aux approches de type technologie de groupe. L'idée est de proposer aux concepteurs d'utiliser un nombre limité de composants prédéfinis. [Erol, 1999] a proposé une formulation mathématique pour la standardisation des composants. C'est un problème d'optimisation non linéaire en nombres entiers [Dupont *et al.*, 1999].

L'objet du suréquipement est de concevoir des produits finis et des modules de telle façon que différentes demandes puissent être satisfaites par une même référence de produit ou de module [Aldanondo *et al.*, 1997] [Dupont *et al.*, 1999]. On obtient ainsi une réduction importante du nombre de références (produit et module) tout en conservant la même diversité au niveau de l'offre. Ce résultat est cependant obtenu au prix d'une augmentation du coût (les fonctionnalités les plus basiques sont satisfaites au prix de la fonctionnalité la plus évoluée). [Lee et Tang, 1998] ont développé un outil mathématique qui permet de trouver le meilleur compromis entre les investissements nécessaires pour la standardisation et les profits qui résultent de la réduction de la diversité, des économies d'échelle et de la diminution des stocks.

### Bilan et positionnement

Pour répondre à la combinatoire des besoins fonctionnels, les concepteurs de produits peuvent proposer trois stratégies : la conception d'une variante unique capable de couvrir tous les besoins, la conception de variantes sur mesure et enfin la recherche de solutions intermédiaires à base de "packs". Pour la plupart des produits industriels, les concepteurs optent pour la troisième solution intermédiaire ayant pour objectif l'utilisation d'éléments standardisés. Dans une approche standardisée, un pack est un produit qui répond simultanément à un ensemble de besoins regroupés dans un segment de demande. Ceci nécessite de segmenter la demande en un ensemble de segments. A chaque segment du besoin doit correspondre un pack. Dans une conception modulaire, une démarche par pack pourra être menée pour chaque module.

Dans notre cas, une solution de conception est un ensemble de packs capable de couvrir tous les besoins. Cette solution est plus facile à gérer et elle est moins coûteuse du fait du nombre limité de variantes à concevoir et à fabriquer. Particulièrement pour le câblage automobile, nous optons pour la conception par packs. La conception d'un pack consiste alors à identifier et à définir les fonctions qui le constituent. Ainsi, un même processus de conception est déroulé pour la conception de chaque pack. L'objectif principal est de tester plusieurs solutions qui se distinguent par le nombre et le type de packs adoptés (combinaison de packs). L'existence de ces conceptions et évaluations répétitives induit un besoin fort d'outils exploitant une même base de connaissances.

### **1.2.7. Conclusion**

L'état de l'art sur l'activité de conception de produits nous a permis de positionner et de cadrer les différents contextes de notre étude.

Nous avons d'abord présenté l'activité et le processus de conception. Ensuite, nous avons résumé les typologies de problèmes de conception pour situer le cadre de nos travaux.

Dans le contexte de conception routinière, nous nous sommes intéressés aux approches de concurrent engineering visant à améliorer le déroulement des différentes phases de conception, notamment la capitalisation et la réutilisation des connaissances.

Puis, nous avons abordé les problématiques liées à la diversité des produits en présentant les différentes actions à mener sur la reconception et la gestion de ces produits afin de maîtriser la forte diversité.

## **1.3. Proposition de démarche de préconception et de personnalisation de produits**

### **1.3.1. Introduction**

Dans la partie précédente (1.2), nous avons dressé un état de l'art sur l'activité de conception qui nous a permis de situer le cadre de notre problématique. La partie qui suit constitue notre première contribution à l'activité de conception.

Le but de cette partie est de proposer une démarche de préconception de produits à forte diversité par une approche par packs. C'est une démarche multi-phases permettant de prendre en compte la diversité du besoin client.

Pour nos travaux, nous visons principalement des produits industriels mettant en œuvre des caractéristiques fonctionnelles et des composants physiques dont les aspects dimensionnels, positionnement de composants et agencement spatial sont d'importance. La démarche que nous présentons est développée principalement pour la préconception du câblage automobile.

Initialement, la problématique de nos travaux est née d'une relation contractuelle avec un équipementier automobile. Les fonctions principales de cet équipementier sont le développement et l'industrialisation de systèmes de distribution électrique pour l'automobile. Ses principaux clients sont les constructeurs automobiles. Nos travaux s'inscrivent dans le cadre des objectifs principaux de cet équipementier, qui sont de proposer rapidement à ses clients une ou plusieurs solutions d'architectures du câblage qui satisfassent leurs besoins et leurs exigences. Ces solutions de câblage doivent être également capables d'évoluer dans le temps suivant la demande du constructeur automobile.

La diversification continue dans l'industrie automobile est liée aux différents systèmes entrant dans la conception des voitures. Ces systèmes présentent de fortes diversités fonctionnelles et techniques. Nous pouvons noter par exemple l'évolution du nombre de variantes possibles d'un modèle de voiture : 11 variantes pour la Renault 4, 60 000 variantes pour la Renault 18 et 175 000 variantes pour la Peugeot 306 [Maurino, 1995]. Cette diversité est en grande partie le résultat de l'évolution technologique, surtout des systèmes électriques et électroniques embarqués. En conséquence, le système de distribution électrique réalisant les connexions entre les différents composants électriques et électroniques devient de plus en plus complexe [Price, 2000]. En effet, le nombre de fils de câblage automobile est passé d'une centaine pour une Peugeot 204 à un

millier pour une Peugeot 605. Il est en conséquence nécessaire de proposer une démarche pour prendre en compte la diversité du besoin client.

L'objectif de notre étude est de réduire les délais du processus de conception, d'aider son déroulement et de pouvoir évaluer rapidement le coût d'une ou de plusieurs solutions de câblage.

Dans la section (1.3.2), nous présentons le descriptif de l'application industrielle pour mettre en œuvre notre démarche de conception. Pour cela, nous définissons le câblage automobile et nous identifions ses différentes structures et caractéristiques.

Les problèmes liés à la conception de packs de produits (1.3.3) nous permettent de proposer une démarche complète pour couvrir les besoins d'un marché.

Ensuite, dans la section (1.3.4), nous présentons en détail notre démarche de préconception. Pour chacune des phases, nous identifions les besoins d'assistance.

## 1.3.2. Le système de distribution électrique

Selon que l'on considère l'utilisateur final de la voiture, le constructeur automobile ou le concepteur (équipementier automobile), le câblage électrique peut être vu comme une entité fonctionnelle ou physique. Pour l'utilisateur final, le câblage électrique est un support physique pour les fonctions électriques et électroniques qui répondent à ses besoins. Pour répondre à la demande des utilisateurs, le constructeur automobile transmet les besoins (fonctions électriques) à l'équipementier pour concevoir et fabriquer le câblage correspondant à ces fonctions (liste de composants). En conséquence, le constructeur automobile, comme acteur intermédiaire entre l'utilisateur et le concepteur, s'intéresse aux deux points de vue fonctionnel et physique du câblage.

### 1.3.2.1. Définition fonctionnelle

Avant tout, le câblage est vu par l'utilisateur d'une automobile comme un ensemble de fonctions et sous-fonctions électriques. L'ensemble des fonctions électriques peut se décomposer en deux sous-ensembles :

- les fonctions obligatoires et présentes dans toute voiture : feux de code et feux de stop, par exemple,
- les fonctions optionnelles, exigées par le constructeur automobile pour répondre à un besoin de l'utilisateur final, par exemple : lève-vitre électrique, airbags latéraux.

Une fonction électrique peut avoir plusieurs niveaux de service selon le choix d'un utilisateur, selon le constructeur automobile et selon le modèle de voiture [Hadj-Hamou *et al.*, 2001b]. Par exemple, la fonction réglage des rétroviseurs latéraux peut varier de zéro (réglage manuel) à la plus complexe (réglage électrique avec rabattement automatique du rétroviseur en marche arrière).

La définition fonctionnelle du câblage est représentée par une structure arborescente des fonctions. Le niveau le plus élevé constitue le produit lui-même, et le niveau le plus bas les fonctions les plus élémentaires, suffisamment basiques pour être décrites aisément. Cet arbre est une description des niveaux de décomposition du produit en fonctions. Hiérarchiser les fonctions d'un produit consiste à définir un ordre de ces fonctions et de les classer de manière à identifier leurs relations de dépendance. La décomposition fonctionnelle est un instrument de l'expression fonctionnelle du besoin client.

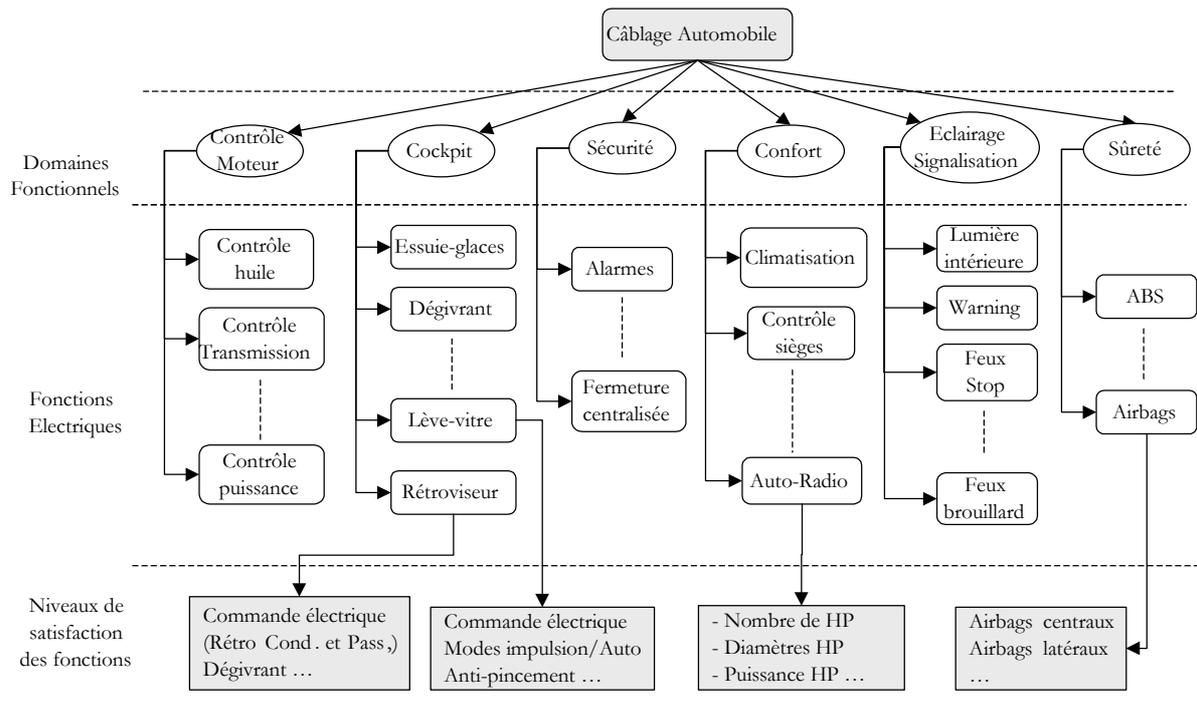


Figure 1.5 – Décomposition fonctionnelle du câblage automobile [Hadj-Hamou *et al.*, 2001b]

Comme le montre la Figure 1.5, nous avons adopté une décomposition en six domaines fonctionnels principaux : le confort, la sécurité, la sûreté, la gestion de l'habitacle, l'éclairage et la signalisation, la gestion et contrôle moteur. Chaque domaine fonctionnel peut être décomposé en une ou plusieurs fonctions électriques que peut supporter le câblage électrique. Nous donnons une liste non exhaustive de cette première décomposition : le confort (la climatisation, le contrôle des sièges, l'autoradio) ; la sécurité (contrôle d'accès, fermeture centralisée) ; la sûreté (airbags, ABS) ; la gestion de l'habitacle (lève-vitre électrique, réglage électrique des rétroviseurs) ; l'éclairage et la signalisation (feux code, lumières intérieures, feux de détresse) et le contrôle moteur (contrôle huile, contrôle puissance).

Le plus bas niveau de la décomposition fonctionnelle représente les différentes caractéristiques des fonctions électriques. En effet, une fonction électrique peut avoir plusieurs niveaux de service selon le choix et la demande d'un client, selon le constructeur automobile et selon le type de voiture (exemple : voiture à deux ou quatre portes). Ces différents niveaux définissent chaque fonction du niveau le plus élémentaire au niveau le plus complexe. Des attributs peuvent également caractériser les fonctions électriques pour générer plusieurs niveaux de définition, par exemple :

- selon le nombre : une fonction électrique peut exister en plusieurs exemplaires dans une voiture. Par exemple : lève-vitres électriques avant et arrière, Airbags frontaux et Airbags latéraux,
- selon qu'une fonction intègre une autre fonction : par exemple le lève-vitre électrique avec un système anti-pincement, le rétroviseur avec un système de dégivrage,
- selon le type et le nombre de composants en interaction avec l'utilisateur de la voiture : lève-vitres électriques en modes automatique et à impulsion, nombre de haut-parleurs pour l'autoradio,

- selon les fonctions techniques : chaque fonction identifiée peut se décomposer en quatre sous fonctions techniques (l'alimentation électrique, l'acquisition de l'information, le traitement de la fonction et l'activation de la fonction).
- selon les choix ergonomiques : les composants en interaction avec l'utilisateur de la voiture peuvent avoir plusieurs positions ergonomiques. Par exemple, le bouton lève-vitre électrique peut être situé sur la porte ou sur le tableau de bord,

### 1.3.2.2. Définition physique

Pour le concepteur, le câblage électrique est un faisceau nécessaire à l'alimentation et au fonctionnement de tous les systèmes électriques embarqués dans une voiture. C'est un produit assemblé constitué de composants élémentaires : fils, connecteurs, fusibles, relais, calculateurs (boîtiers électroniques) et protections. Les composants élémentaires peuvent être standard, comme les connecteurs, ou paramétrables comme les fils caractérisés par des attributs (longueur, puissance). Les éléments du câblage assurent les connections entre les différents composants d'acquisition d'information (boutons, capteurs) et les composants actionneurs (moteurs, lampes), comme le montre la Figure 1.6.

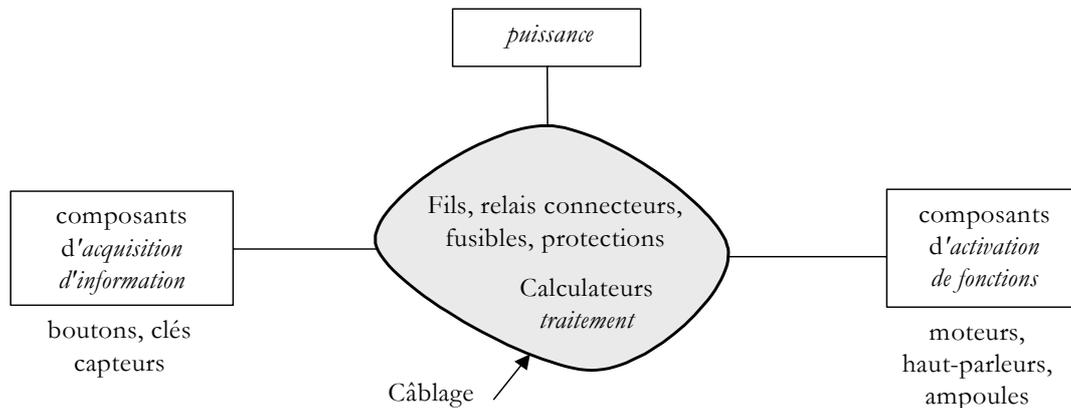


Figure 1.6 – Eléments du câblage pour l'automobile

La décomposition physique est élaborée en réponse à l'expression fonctionnelle du besoin. Nous avons montré dans le paragraphe précédent que le dernier niveau de la décomposition fonctionnelle représente les fonctions techniques. Chaque fonction électrique élémentaire est définie par un schéma de principe qui représente les systèmes électriques et électroniques, en interaction avec l'utilisateur, nécessaires pour accomplir la fonction voulue. Le schéma de principe traduit les flux électriques et d'information. Les systèmes électriques et électroniques regroupent quatre groupes de composants :

- Groupe "puissance" pour alimenter les composants en puissance : le fonctionnement de tout composant électrique nécessite de la puissance. Cette puissance est fournie par la batterie ou par l'alternateur après passage par un fusible. Elle peut être également distribuée à partir d'un autre composant électrique déjà alimenté sur le même fusible.
- Groupe "capteur" pour acquérir l'information pour déclencher la fonction : pour déclencher une fonction électrique, l'utilisateur de la voiture se sert d'un composant, souvent un bouton ou une clé. Ce composant peut être réutilisé pour mettre fin à la tâche de la fonction. Pour des fonctions plus élaborées, l'information peut être acquise par un capteur d'information (de pression, de température).

- Groupe "calculateurs" pour traiter l'information acquise : les fonctions électriques deviennent de plus en plus complexes. Les informations acquises par les capteurs sont multiples et nécessitent un traitement. L'utilisation de programmes de calcul et de traitement devient indispensable. Ces programmes sont implémentés dans des boîtiers électroniques appelés calculateurs. Les calculateurs ne sont pas requis pour toutes les fonctions électriques. Certaines fonctions peuvent être satisfaites en reliant la puissance et l'information "capteur" à un relais. Dans ce cas, le relais joue le rôle de calculateur basique. Toutefois, l'intégration et les dépendances entre les fonctions électriques exigent un échange fiable d'information, donc de calculateurs.
- Groupe "actionneur" pour activer la fonction électrique : la concrétisation d'une fonction électrique se fait par un actionneur. Ce composant est activé soit par le capteur qui l'alimente directement après acquisition de l'information, soit par le calculateur après traitement de cette information. Un actionneur peut être, par exemple, un moteur électrique, une ampoule ou encore un haut-parleur.

Nous avons identifié trois catégories de fonctions électriques suivant le type de schéma de principe requis (Figure 1.7) : fonction sans traitement par calculateur, fonction gérée par un seul calculateur, et fonction gérée par plusieurs calculateurs qui peuvent communiquer et échanger des informations.

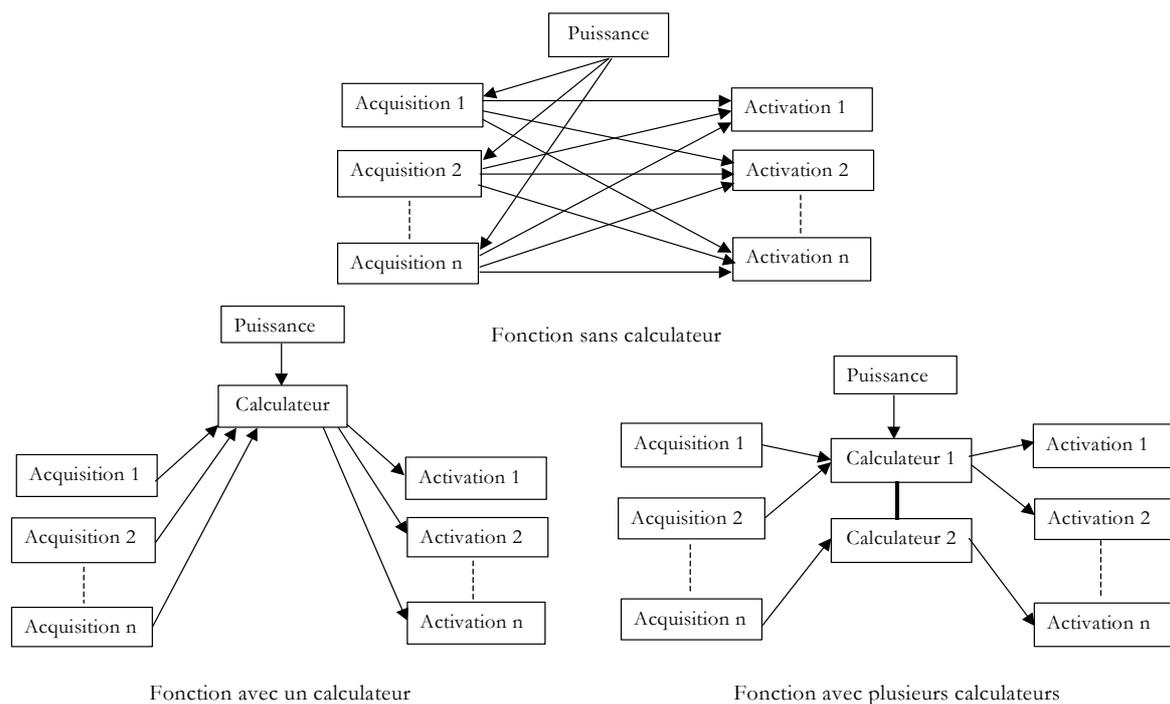


Figure 1.7 – Schémas de principe d'une fonction électrique

L'assemblage des composants du câblage (fils, connecteurs et protections) sont des tâches qui demandent un fort taux de main-d'œuvre peu qualifiée. Il est intéressant de rechercher un compromis entre la réactivité aux variations de la demande des clients et la possibilité de délocaliser une part de cet assemblage dans des pays ayant des coûts de main-d'œuvre faibles. Le découpage du câblage automobile en modules à interconnecter ouvre la possibilité de délocaliser la production des modules. De plus, chaque module étant un câblage simple, des gains locaux de productivité en résultent. Cette démarche implique toutefois d'augmenter la diversité gérée en

production, c'est-à-dire le nombre de références de modules (diversité interne), de constituer des stocks de références de modules, et de gérer des volumes de transport importants, d'où une logistique plus lourde. Le choix d'un découpage du câblage en modules conditionne la chaîne logistique à mettre en place : localisation de la production, de l'assemblage, dimensionnement des stocks et logistique de transport. Nous distinguons deux manières de découper le câblage en modules qui sont liées à des distinctions d'organisations de la chaîne logistique et du service rendu au constructeur.

- Le découpage du câblage électrique en modules peut être adopté quand le constructeur automobile (client) demande à se faire livrer non pas un câblage complet mais plutôt un ensemble de modules. Le montage des modules sur la voiture se fait au milieu de la chaîne d'assemblage du constructeur. Un enjeu est ici de fabriquer des références de modules dans des pays à bas coûts et de conserver sur un site proche du constructeur des opérations limitées de finition : connexion des calculateurs, finition des câblages.
- Un câblage peut être découpé pour des raisons de contraintes de fabrication et d'assemblage. En effet, même si le constructeur demande à se faire livrer un câblage complet, l'équipementier peut trouver intérêt à décomposer le câblage en modules pour délocaliser la production des modules et ne conserver qu'un site avancé pour l'assemblage final.

Les critères de décomposition peuvent être soit physiques (un module pour une zone géographique de la voiture), soit fonctionnels (un module pour un ensemble fonctionnel). Le découpage du câblage en modules ouvre donc beaucoup plus de liberté dans la conception du câblage et l'organisation de la chaîne logistique. Il demande par contre d'évaluer l'impact des choix effectués : coût global de gestion du flux, dimensionnement de stocks, évaluation de risques d'obsolescence et surcoûts matière.

### 1.3.2.3. Définition géométrique

La structure géométrique du câblage est définie d'abord par :

- Les positionnements des composants capteurs : les positions ergonomiques sont souvent imposées par le constructeur automobile (boutons de commande sur porte ou sur tableau de bord). Les positionnements exacts des capteurs sont déterminés selon la structure de la voiture et les espaces dédiés à ces composants. Certains capteurs sont situés dans des espaces spécifiques pour pouvoir calculer un paramètre (une température par exemple).
- Les positionnements des actionneurs : les positions ergonomiques sont également identifiées selon les désirs des utilisateurs, donc imposées par le constructeur (les haut-parleurs sur les portes). Leurs positionnements peuvent être aussi soumis à des contraintes techniques (le moteur lève-vitre électrique ne peut pas être situé ailleurs que dans la porte) et déterminés selon la structure de la voiture.

En plus des positionnements de tous les composants capteurs et actionneurs, la structure géométrique de la voiture définit également le routage de tous les fils électriques dans les branches (torons) de la structure de la voiture. Un fil est défini par une origine et une destination. Il peut y avoir plusieurs chemins (routes) pour un seul fil. Une branche peut contenir plusieurs fils ; cependant ce nombre de fils est limité par le diamètre de la branche de sorte qu'elle ne soit pas trop rigide.

La Figure 1.8 illustre trois possibilités de choix d'architecture de branches pour le routage des fils. Les connecteurs sont les éléments terminaux des branches. Le regroupement des fils offre la

possibilité, dans certains cas, de remplacer sur une branche plusieurs fils équivalents par un seul fil qui dépend du routage choisi, c'est le cas par exemple des fils utilisés pour l'alimentation provenant d'un même fusible.

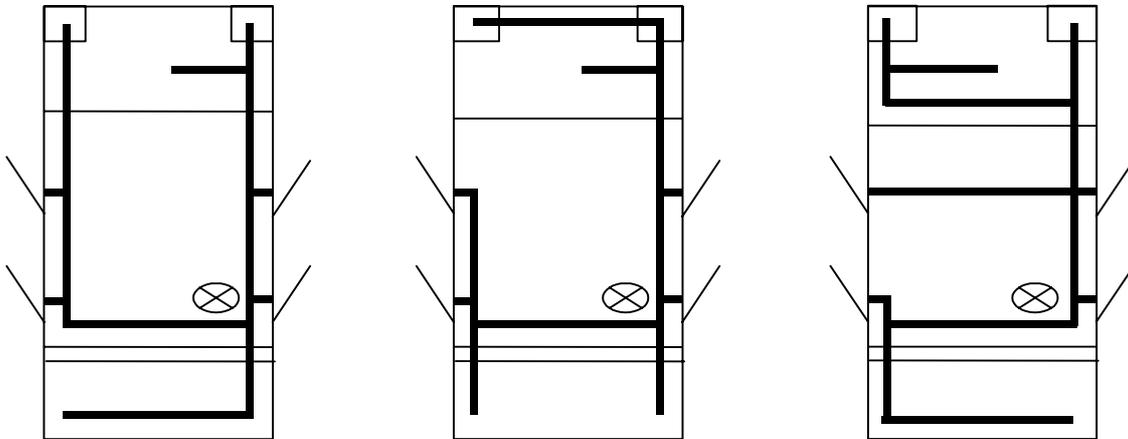


Figure 1.8 – Exemples d'architectures globales du câblage

#### 1.3.2.4. Fabrication et assemblage du câblage

Le mode opératoire de réalisation des câblages peut faire apparaître trois types de procédés :

- fabrication des composants élémentaires : par exemple les calculateurs,
- fabrication des modules de câblage, et
- assemblage final des modules.

Si le câblage n'est pas décomposé en modules, le schéma industriel comprend généralement (i) un ou plusieurs sites de fabrication de composants et (ii) un site d'assemblage final proche de chaque ligne d'assemblage du constructeur.

Si le concepteur choisit de décomposer le câblage, son schéma industriel est composé de (i) un ou plusieurs sites de fabrication de composants, (ii) un ou plusieurs sites de production de modules et (iii) un site d'assemblage final proche de chaque ligne d'assemblage du constructeur.

Dans le cas de livraison de modules, le schéma industriel comprend (i) un ou plusieurs sites de fabrication de composants, (ii) un ou plusieurs sites de fabrication de modules et (iii) un site proche de chaque ligne d'assemblage du constructeur pour le stockage des modules et la connexion des calculateurs.

En conséquence, le choix de décomposer ou non le câblage en plusieurs sous-ensembles permet de donner une latitude à la définition de la chaîne logistique.

### 1.3.3. Démarche globale de conception

L'ensemble des besoins fonctionnels des clients utilisateurs, déclinés en niveaux de fonctionnalité, peut se regrouper avec une combinatoire forte. Suivant le niveau de satisfaction de ces besoins et le nombre de variantes, nous distinguons trois solutions que peut proposer le concepteur de câblages.

#### 1.3.3.1. Conception sur mesure

Lors de l'assemblage final de chaque produit, le client commande la conception et la fabrication d'une variante qui correspond strictement à son besoin spécifique. La diversité de la demande est très importante (des millions de câblages possibles) ; la gestion en juste-à-temps s'avère bien adaptée à cette situation. Dans ce cas, le produit est personnalisé. Il existe pratiquement autant de commandes de produits que de variantes à concevoir et fabriquer. Pour ce type de produit, généralement haut de gamme, l'utilisateur final dispose d'un choix important de fonctions et de niveaux de service. La conception de ce produit est fondée sur une diversité externe du besoin très importante et un faible volume en production pour chaque variante de produit. Pour pouvoir supporter cette diversité, les variantes du produit sont fabriquées à la commande (sur mesure), au plus tard et proche du constructeur. Cette situation industrielle est appelée "assemblage à la commande" comme expliquée dans [Aldanondo *et al.*, 2000]. Elle impose d'avoir une démarche modulaire en associant un module par besoin fonctionnel. En production, on ne peut pas bénéficier des effets d'apprentissage bénéfiques pour la qualité et d'une bonne productivité du fait de l'absence de production routinière et répétitive. La conception de ces produits ne permet pas de réaliser des économies d'échelle en production. Par contre, les coûts de suréquipement sont minimisés.

#### 1.3.3.2. Conception d'un produit unique

Le concepteur propose aux utilisateurs une seule variante du produit. Il développe alors une seule solution de produit répondant à tous les besoins exprimés par le niveau de fonctionnalité le plus élevé. Dans ce cas, la diversité externe (vue par l'utilisateur de voitures), est quasiment nulle. Pour cette situation extrême et rare en industrie (surtout automobile), il est possible d'automatiser la fabrication du produit, de le produire sur stocks et de bénéficier des effets série et d'apprentissage en production. La conception de ce produit est fondée sur une diversité nulle et un fort volume en production dans une optique de minimisation des coûts malgré un coût maximum de suréquipement. Le suréquipement est utilisé pour standardiser les produits et gérer moins de références produit en production et en stockage.

#### 1.3.3.3. Conception par packs

Le concepteur regroupe toutes les demandes des utilisateurs en plusieurs segments de marché. Chaque segment est caractérisé par un niveau de fonctionnalité sur chaque besoin fonctionnel. Une demande sera alors affectée au segment ayant le niveau de fonctionnalité supérieur ou égal le plus proche. Dans le cas de l'automobile, le constructeur regroupe les besoins fonctionnels en packs : packs bas de gamme, moyenne gamme, haut de gamme et différents niveaux intermédiaires. Un pack est défini par un ensemble de fonctions électriques d'un niveau de service donné. Cette solution intermédiaire, adoptée par beaucoup de concepteurs, met en évidence l'opposition entre les deux premières conceptions et permet de trouver un équilibre entre les coûts de gestion de la diversité (variété du produit) et les coûts de suréquipement. Les packs peuvent être fabriqués sur prévision et sur stock.

La Figure 1.9 montre le rapport entre la diversité fonctionnelle et la productivité relatives aux trois solutions.

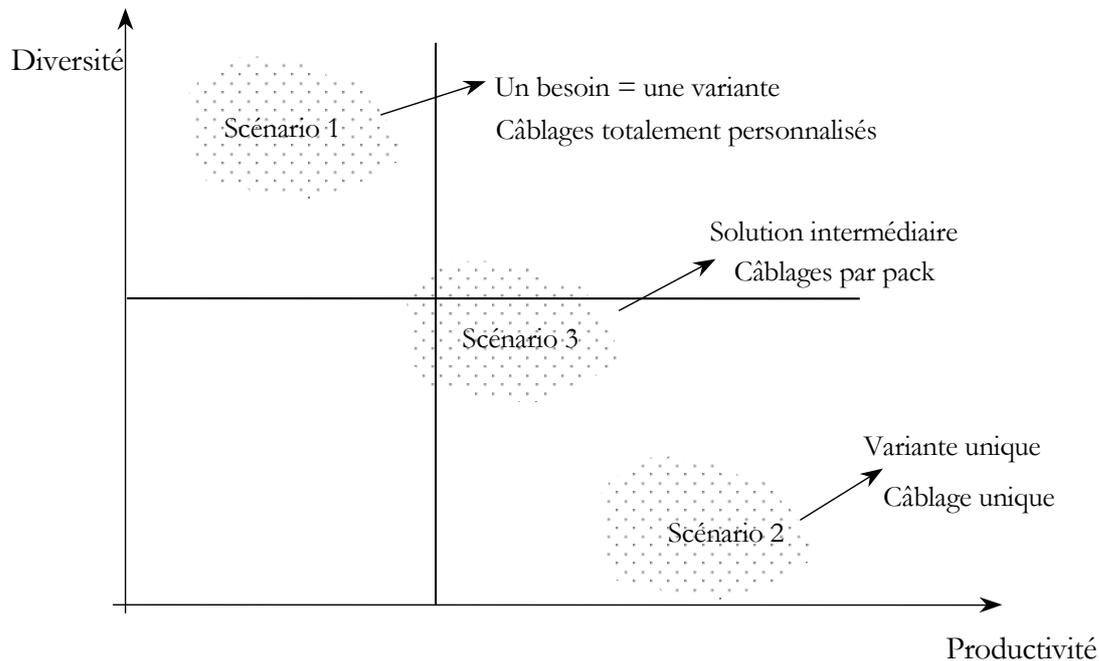


Figure 1.9 – Niveaux de diversité et de productivité des trois scénarios de conception

Notons que dans une approche sur mesure, les modules sont définis a priori d'après le regroupement fonctionnel tandis que dans une approche par pack, les modules sont faits a posteriori par ressemblance de solutions sur critère fonctionnel ou physique. Toutefois, nous pouvons adopter une démarche pack à l'intérieur des modules.

C'est l'aide à la conception de la solution par pack que nous visons dans cette étude. Dans ce cas, la problématique d'aide à la conception consiste d'abord à se fixer le nombre et le type de packs à définir pour segmenter au mieux les besoins des utilisateurs. Ensuite, chaque pack est conçu. Une solution de conception du câblage est donc un ensemble de packs définis.

En conséquence, le concepteur est confronté au problème de conception des "ensembles packs". Ce problème regroupe (i) la détermination du nombre de packs, (ii) les fonctions, sous-fonctions et les niveaux de service des fonctions que doit constituer chaque pack, et enfin (iii) le résultat de conception des packs en termes de coûts (Figure 1.10).

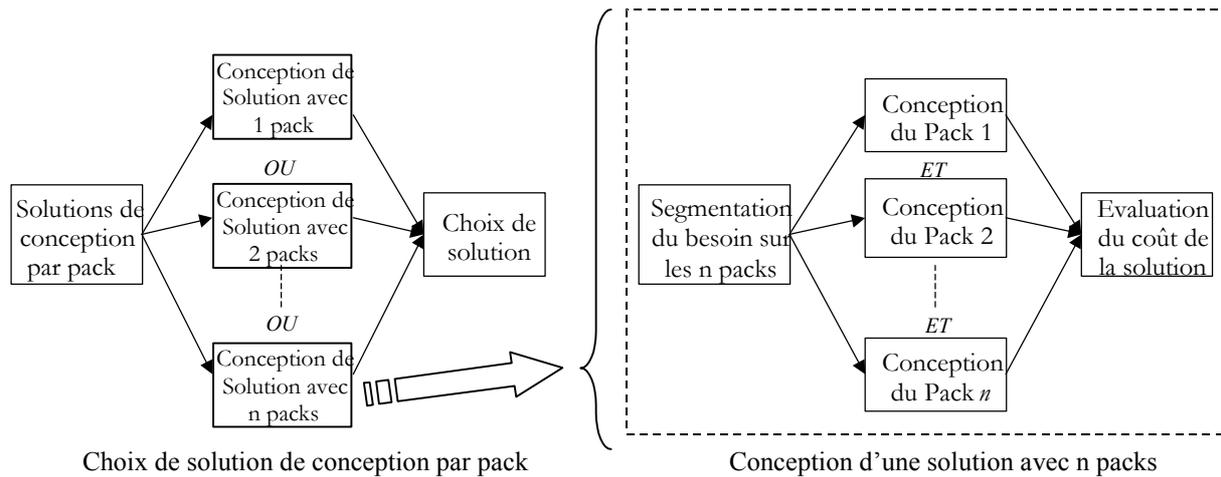


Figure 1.10 – Approche par packs de conception du câblage

Dans cette première partie de notre travail, nous proposons une démarche et des outils d'assistance pour la conception d'un pack de câblage. Ces outils doivent tenir compte de la diversité fonctionnelle du besoin à satisfaire. Pour obtenir une solution de conception du câblage, notre démarche doit être déroulée pour la conception de chaque pack appartenant à cette solution.

L'évaluation et le choix de solutions de conception (un ensemble de packs) prenant en compte les aspects logistiques seront traités en Partie II.

### 1.3.4. Démarche de conception proposée pour un pack

La méthode de conception que nous proposons dans cette section s'inscrit dans un courant qui a donné naissance à différentes méthodes [Tollenaere, 1998]. Le principe de découpage du processus de conception en plusieurs phases se retrouve dans chacune de ces méthodes. La différence réside principalement dans le niveau d'abstraction de départ du processus et dans le niveau de spécification d'arrivée. Elle se situe également dans le nombre de phases et leurs spécifications ainsi que sur le caractère générique d'application de la plupart des phases à des domaines très diversifiés.

En règle générale, une première phase d'identification et de traduction du besoin est identifiée dans toutes ces méthodes. Elle consiste à spécifier les fonctionnalités du produit. Dans notre cas, cette première phase est considérée comme la plus importante et la plus déterminante. Elle a pour but de maîtriser la diversité fonctionnelle du besoin. Elle constitue notre principal apport en conception de produit. La phase suivante consiste à rechercher les solutions techniques et les solutions de principes répondant à ces fonctionnalités. Viennent ensuite la définition de l'architecture globale du produit et enfin la conception des détails.

Nos travaux dans le domaine de la conception ont conduit à la proposition d'une approche de configuration pour la prise en compte de la diversité des besoins fonctionnel et physique dans l'objectif de satisfaire les exigences du client. Cette approche permet de proposer rapidement plusieurs solutions et de s'assurer de la cohérence des choix effectués. La phase traditionnelle de conception détaillée correspond ensuite à un affinement de la définition du produit pour une architecture identifiée. Notre démarche de conception est composée de plusieurs phases. Pour chaque phase, nous identifions les besoins et les résultats ainsi que les approches et les outils d'assistance.

Par ailleurs, nous constatons que les processus de conception sont différents d'un secteur à un autre (mécanique, électrique), d'une entreprise à une autre et d'un produit à un autre. De ce fait, nous proposons de spécifier une démarche globale de conception routinière de produits à forte diversité mais que nous appliquons particulièrement à la conception du câblage automobile.

Pour illustrer nos propos, nous présentons, tout au long de notre démarche de conception, un exemple de conception du câblage de la fonction lève-vitres d'une voiture. Cette fonction peut être constituée de deux sous-fonctions : lève-vitre électrique porte conducteur et lève-vitre électrique porte passager avant.

Le fonctionnement de chacune de ces deux sous-fonctions est défini par un schéma logique constitué des composants suivants :

- un ou plusieurs boutons : pour déclencher une sous-fonction lève-vitre, l'utilisateur de la voiture se sert d'un ou de plusieurs boutons. Ils sont caractérisés par leur nombre, leur position ergonomique (sur les portes, sur le tableau de bord) et de leur type (simple, double, automatique, à impulsion),
- un calculateur : un calculateur peut être dédié à chacune des deux sous-fonctions, chaque sous-fonction peut avoir son propre calculateur où les boutons sont reliés directement au moteur électrique,
- un moteur électrique : il est utilisé pour activer (monter ou descendre) la vitre d'une porte à chaque fois que l'utilisateur se sert d'un bouton. Il est situé à l'intérieur de la porte,

Une fonction anti-pincement peut être intégrée à une sous-fonction lève-vitre dans le cas où le mouvement de la vitre serait en continu (automatique).

Le déroulement d'un processus de conception d'un produit revient à exécuter les différentes phases qui le caractérisent, à travers lesquelles le produit est défini progressivement, allant des caractéristiques fonctionnelles aux représentations géométriques.

Notre démarche s'articule en deux grandes étapes (Figure 1.11) :

- Identification et traitement de la diversité fonctionnelle du besoin : l'objectif de cette étape est d'aboutir à une définition fonctionnelle et physique du produit. Cette étape se décline en deux phases principales : la définition fonctionnelle et la définition technologique du produit.
- Agencement et prise en compte des contraintes géométriques : l'objectif de cette étape est de fournir un schéma géométrique du produit. Elle consiste, dans une première phase, à définir les positionnements exacts de tous les composants identifiés. Une phase de décomposition du produit final en modules complète cette étape.

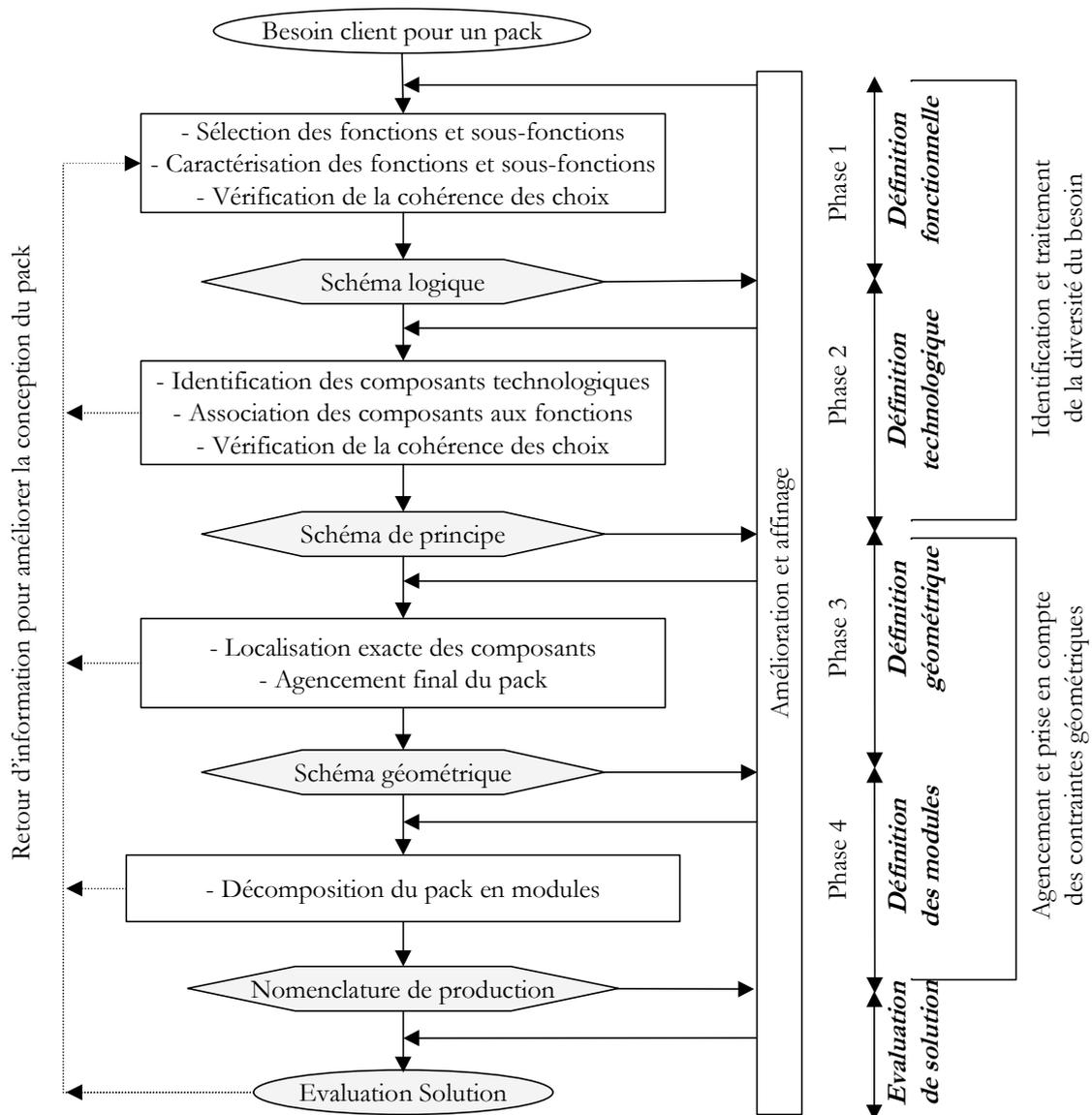


Figure 1.11 – Phases de notre démarche de conception de pack

Ces deux grandes étapes comportent un certain nombre de phases successives au cours desquelles un besoin client se transforme en un produit complètement défini. Le résultat de chaque phase correspond à une définition d'un point de vue du câblage que nous avons détaillée dans la section (1.3.2) : définition fonctionnelle, définition technologique, définition géométrique et définition des modules.

### 1.3.4.1. Définition fonctionnelle

L'objectif de cette phase initiale est de prendre en compte le besoin des utilisateurs exprimé en termes de choix en exploitant les éléments de définition fonctionnelle du produit évoqués dans la section (1.3.2.1). Cette phase permet de traduire leurs besoins en un ensemble de fonctions par le passage du besoin identifié à un besoin validé. La tâche du concepteur est de mettre en évidence une structure détaillée des fonctions et sous-fonctions identifiées. Chaque fonction est ensuite caractérisée par la spécification de ses paramètres conduisant à la définition de son schéma logique. Cette phase est complétée par la spécification des interactions et connexions que peut avoir le produit avec son environnement externe. Le déroulement de cette phase est en forte

interaction avec le client. Elle correspond à la sélection des fonctions et sous-fonctions, à la caractérisation de chaque fonction et sous-fonction identifiée et à la vérification de la cohérence de tous les choix effectués.

### **Sélection des fonctions et sous-fonctions**

Un produit industriel est avant tout destiné à un utilisateur pour ses fonctions. Ces dernières traduisent un ensemble de services et actions que peut fournir le produit. Un produit se décline en plusieurs variantes selon qu'une ou plusieurs fonctions possibles sont sélectionnées ou non.

Durant cette première phase fonctionnelle, le concepteur sélectionne et valide toutes les fonctions et sous-fonctions que doit remplir le produit pour satisfaire son utilisateur. Les fonctions et sous-fonctions obligatoires peuvent être sélectionnées par le concepteur sans l'intervention du client. D'autres fonctions, dites optionnelles, sont sélectionnées selon le désir du client qui valide leur présence ou non.

Dans le cas du câblage automobile, les fonctions sont principalement des fonctions électriques et électroniques. Les fonctions feux code, lumière intérieure, clignotant et autres sont obligatoires et doivent en outre être sélectionnées pour tous les packs. Le caractère obligatoire provient par exemple de contraintes de réglementation. Les fonctions telles que le lève-vitre électrique et les airbags latéraux sont par contre optionnelles et font l'objet d'un choix par le constructeur automobile pour couvrir le segment de la demande couvert par le pack. La définition fonctionnelle est caractérisée par une forte combinatoire dans les choix de fonctions et sous-fonctions électriques.

Au terme de cette phase, le concepteur et le client (constructeur automobile) convergent vers une définition fonctionnelle du pack. C'est une structure arborescente des fonctionnalités électriques et électroniques de chaque pack.

### **Caractérisation de chaque fonction et sous-fonction**

Le concepteur caractérise ensuite le niveau de service de chacune des fonctions et sous-fonctions identifiées et validées dans la phase précédente pour répondre à un besoin pack. Cette tâche consiste à spécifier toutes les caractéristiques de ces fonctions afin de répondre complètement à la traduction du besoin formulé par le client. En effet, selon le niveau de sophistication d'une fonction, le service fourni par le produit n'est pas le même. Le concepteur en interaction avec le client est amené à spécifier ces niveaux par le choix de valeurs de paramètres, d'attributs et de schémas de chaque fonction. Il valide également les différentes interactions de chaque fonction avec d'autres fonctions et avec l'environnement externe au produit.

Dans le cas de conception du câblage pour l'automobile, le concepteur sélectionne et définit, pour chaque fonction/sous-fonction identifiée, les composants d'acquisition d'information, leur nature et leur nombre (type, nombre et nature des boutons et des capteurs) et les composants actionneurs (type de moteur lève-vitre, puissance d'une lampe, nombre de lampes). Le concepteur valide également des caractéristiques ergonomiques des fonctions du pack. L'exemple de la fonction lève-vitres montre que le concepteur a le choix entre l'utilisation de quatre boutons (deux pour chaque vitre, un pour le mode automatique et l'autre pour le mode à impulsion) ou deux boutons (un pour chaque vitre assurant simultanément les deux modes automatique et à impulsion). Des choix de positionnement ergonomique de chaque composant complètent cette phase. Par exemple, les boutons lève-vitres peuvent être situés sur les deux portes avant ou sur le

tableau de bord. Notons que dans notre cas, tous les composants capteurs et actionneurs sont supposés prédéfinis.

### Vérification de la cohérence des choix

Avant toute validation, le concepteur vérifie que tous les choix effectués sur les fonctions, les sous-fonctions ainsi que leurs caractéristiques sont tous compatibles et cohérents. Les contraintes limitant les choix peuvent être diverses : contraintes ergonomiques, de compatibilité de fonctions et de caractéristiques de fonctions, limitation des composants à connecter, contraintes technologiques (de métiers) et contraintes de ressources. Etant donné un nombre important de choix et une importante imbrication des contraintes (forte combinatoire), le concepteur doit être assisté par des outils de vérification de la cohérence.

Par exemple, le système anti-pincement pour la fonction lève-vitre existe seulement dans le cas de choix de mode automatique (mouvement en continu de la vitre), la fonction climatisation n'est autorisée que si la puissance de la voiture dépasse une certaine valeur, la fonction lève-vitre arrière n'est sélectionnée que dans le cas de voitures à cinq portes. Notons que les différentes contraintes et limitations existent entre les caractéristiques d'une même fonction mais peuvent concerner également des dépendances entre les caractéristiques de différentes fonctions.

### Résultat

Le résultat de cette première phase (définition fonctionnelle) est une décomposition arborescente des différentes fonctions que doit satisfaire le pack. La racine de l'arbre correspond au pack, les différents nœuds intermédiaires décrivent les fonctions et les sous-fonctions et enfin, les feuilles correspondent aux niveaux de service des fonctions et sous-fonctions. Un niveau de service d'une fonction est représenté par un schéma logique qui décrit les caractéristiques ergonomiques de la fonction et de ses différents composants capteurs et actionneurs. Les arcs de l'arbre fonctionnel supportent des liens de décomposition fonctionnelle et/ou des liens logiques entre composants capteurs et actionneurs.

Pour notre exemple, la Figure 1.12 montre un schéma logique de la fonction lève-vitres. Ce schéma logique doit exister si le client sélectionne la fonction lève-vitres et ses deux sous-fonctions (lève-vitres porte conducteur et porte passager), c'est-à-dire cette fonction et ses deux sous-fonctions appartiennent à la décomposition fonctionnelle du pack. Le schéma logique est défini par une liste de liens logiques entre les différents capteurs et actionneurs validés pour ces deux sous-fonctions électriques.

Sur la porte conducteur, nous distinguons trois boutons : deux boutons pour activer le moteur lève-vitre conducteur (en modes impulsion et automatique), un troisième bouton pour activer en mode impulsion le moteur lève-vitre passager. Puisque la vitre conducteur peut être levée en mode automatique, nous avons choisi de contrôler son mouvement par un système anti-pincement qui peut être activé par un capteur.

Sur la porte passager, le lève-vitre électrique est commandé uniquement en mode impulsion par deux boutons : un bouton situé sur la porte passager et un autre bouton sur la porte conducteur. Dans ce cas, le système anti-pincement n'est pas indispensable.

Les liens entre composants (moteurs, boutons, capteur) représentent les différentes connexions électriques. Ils symbolisent les flux électriques.

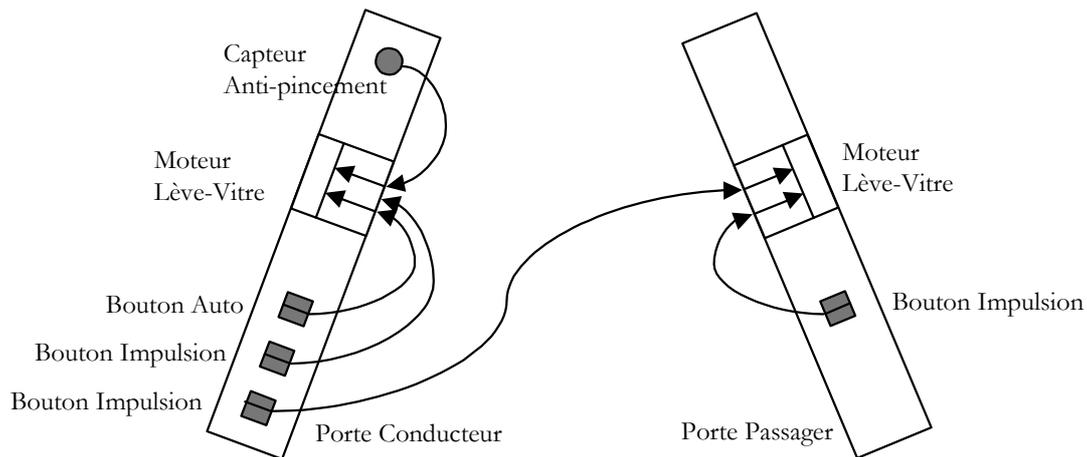


Figure 1.12 – Schéma logique validé de la fonction lève-vitre électrique avant pour un pack

### 1.3.4.2. Définition technologique

Durant cette phase, des solutions technologiques sont associées au schéma logique caractérisé dans la phase précédente (définition fonctionnelle). La recherche de ces solutions correspond à l'affectation de composants technologiques aux différentes fonctions, sous-fonctions et autres composants validés dans la phase initiale. Cela revient à effectuer les choix de principes de solution. Pour cela, nous exploitons les éléments de définition physique du produit exposés dans la section (1.3.2.2).

Autrefois, les architectures de câblage développées étaient composées uniquement de capteurs et d'actionneurs connectés directement par des fils électriques. Actuellement, l'introduction et le développement de boîtiers électroniques permettent de traiter et d'intégrer plus de fonctions et d'équipements électroniques. La fonction principale de ces boîtiers est l'exécution des modules logiciels qui commandent tous les capteurs et les actionneurs intégrés dans le système électrique. La définition technologique d'un pack s'effectue par l'identification des composants technologiques, l'association des composants technologiques aux différentes fonctions électriques et enfin la vérification de la cohérence des choix effectués.

#### Identification des composants technologiques

Durant cette tâche, le concepteur identifie le nombre, la nature et les emplacements géographiques de tous les composants technologiques. Un même composant peut être associé à une ou plusieurs fonctions et à un ou plusieurs autres composants.

Dans le cas du câblage automobile, la tâche du concepteur consiste à spécifier les différents boîtiers électroniques, leurs caractéristiques et leurs emplacements dans la structure de la voiture. Un boîtier électronique est utilisé pour les traitements électronique et informatique d'une ou plusieurs fonctions. Généralement, un boîtier électronique est dédié soit à un groupe de fonctions (contrôle moteur, sécurité, confort), donc associé à tous les éléments de ce groupe fonctionnel, soit à une zone géographique de la voiture (le cockpit, les portes, le moteur).

Notons également que tous les boîtiers électroniques sont supposés prédéfinis. Le problème de conception de ces boîtiers n'entre pas dans le champ de notre étude.

## **Association des composants technologiques aux différentes fonctions**

Les composants technologiques sont associés aux différentes fonctions. Il est à noter qu'une fonction peut nécessiter plusieurs composants différents et qu'un même composant peut être utilisé par plusieurs fonctions.

Dans notre cas, le choix d'une définition technologique consiste à associer un ou plusieurs boîtiers électroniques à chaque fonction, sous-fonction, capteur et actionneur déjà identifiés dans la première phase de définition fonctionnelle. Cette association doit se faire en respectant toutes les contraintes (par exemple, les contraintes de limitation de la puissance, du nombre de boîtiers électroniques). Si une fonction électrique est associée à un boîtier, alors tous les composants capteurs et actionneurs du schéma logique de cette fonction le sont également.

## **Vérification de la cohérence des choix**

La vérification de cohérence vise simplement à s'assurer de la bonne compatibilité des composants et des composants vis-à-vis des fonctions documentées lors de la définition fonctionnelle.

Pour notre application, les contraintes décrivant les associations possibles ne sont pas nombreuses (la combinatoire est faible) et sont relativement simples à gérer. Par conséquent, le problème de vérification de la cohérence n'est pas difficile. La plupart des choix à effectuer sont de simples héritages (au sens "objet informatique") à partir des choix effectués dans la phase initiale. Le fait d'associer un boîtier à une fonction implique automatiquement son association à toutes les sous-fonctions et composants de la fonction.

## **Résultat**

Le résultat de la phase de définition technologique est un schéma de principe d'un pack. Le schéma de principe correspond à une solution technologique du pack et éventuellement à sa nomenclature physique (ensemble de composants).

Dans notre cas, le résultat de cette phase est un schéma de principe détaillé du pack avec les boîtiers électroniques associés pour traiter les fonctions. La Figure 1.13 illustre un exemple de schéma de principe (solution technologique) de la fonction lève-vitres avec deux calculateurs : un pour chaque porte. Au niveau de cette phase de conception, les liens entre les composants terminaux sont des liens logiques et ne peuvent être considérés comme des fils électriques.

Tous les composants terminaux de la fonction lève-vitre porte Conducteur (respectivement Passager) sont associés au calculateur situé dans la porte Conducteur (respectivement Passager). Le calculateur assure le traitement de l'information et le passage du flux électrique.

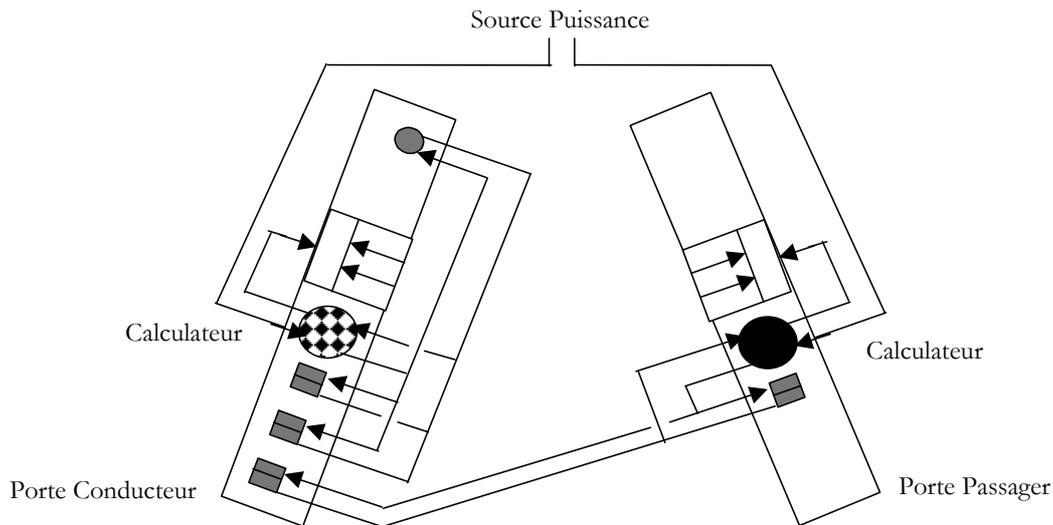


Figure 1.13 – Schéma de principe de la fonction lève-vitres avant avec les calculateurs associés

### 1.3.4.3. Définition géométrique

La définition géométrique d'un produit comprend deux sous-phases : une première sous-phase pour définir des positionnements exacts de tous les composants et une seconde pour l'agencement final du pack.

Cette phase exploite les éléments de la définition géométrique du câblage introduits dans la section (1.3.2.3).

#### Localisation exacte des composants

Cette tâche consiste à définir les localisations (positionnements) exactes de tous les composants du pack de produit les uns par rapport aux autres dans un référentiel prédéfini.

Pour notre cas, le constructeur automobile fournit au concepteur du câblage une ou plusieurs représentations géométriques de la caisse d'un modèle de voiture. Cette représentation est un référentiel, généralement en trois dimensions, où les emplacements possibles alloués aux différents composants (d'acquisition d'information, les actionneurs et les boîtiers électroniques) sont localisés par des coordonnées spatiales. Le concepteur identifie les coordonnées spatiales exactes des composants par la superposition de la représentation géométrique fournie par le constructeur avec le schéma de principe défini précédemment.

#### Agencement final du produit

Le concepteur remplace tous les éléments logiques du schéma de principe d'un pack par des éléments physiques assurant les différentes connexions entre les composants. L'identification des connexions permet de définir un agencement final du pack.

Pour notre application, cette phase correspond à la phase de routage et regroupement des fils. Nous remplaçons les liens logiques par des fils électriques (fils de puissance et fils d'information) pour permettre la circulation des flux de puissance et d'information. Pour cela, nous routons les

fil suivant des schémas d'architecture qui présentent les chemins possibles pour les fils (Figure 1.8 de la section 1.3.2.3).

Les éléments terminaux des fils représentent les connecteurs. Les fils pouvant emprunter un même chemin sont regroupés pour former des branches (torons de fils). Cette tâche se fait sous des contraintes de non-rigidité limitant le nombre de fils à regrouper sur une même branche. Il est également possible qu'un ensemble de fils, routés sur un même chemin et ayant les mêmes caractéristiques, soit remplacé par un seul fil (c'est le cas des fils utilisés pour fournir de la puissance ou de bus pour l'échange d'information entre boîtiers électroniques s'ils sont reliés au même fusible). Cette pratique permet de réduire le nombre de fils et le nombre de connecteurs à utiliser.

## Résultat

Le résultat final de cette phase est un agencement physique et détaillé du pack. C'est un schéma géométrique du pack.

Pour notre exemple, la Figure 1.14 montre un schéma géométrique du pack de la fonction lève-vitres définie précédemment. Nous avons ainsi remplacé tous les liens logiques par des fils électriques.

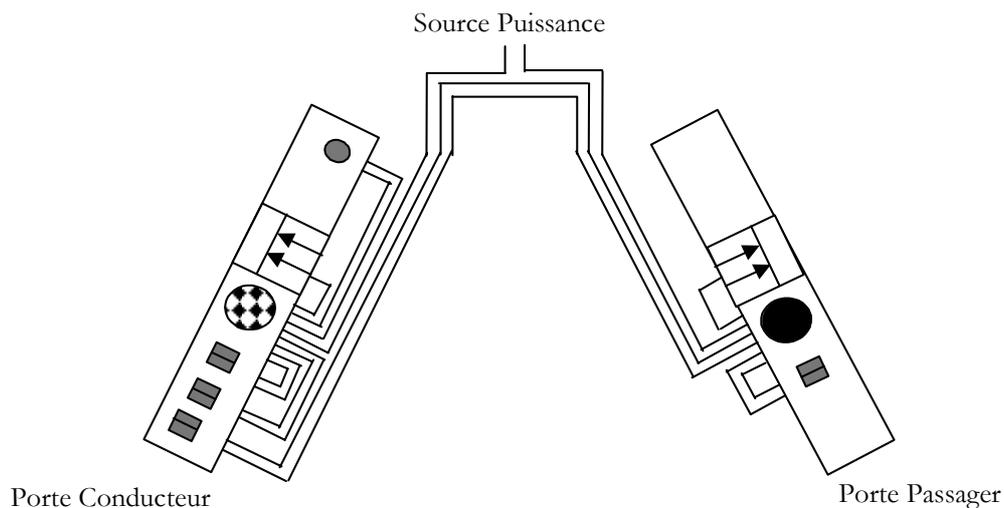


Figure 1.14 – Exemple de schéma géométrique de la fonction lève-vitres

### 1.3.4.4. Définition des modules

Le résultat de toutes les phases précédentes est un pack spécifique à un segment particulier du besoin. L'objectif principal est de fournir les produits dans des délais courts tout en maîtrisant le coût global. Dans cet objectif, le pack conçu peut être décomposé en plusieurs modules.

Pour notre application, la décomposition finale du pack câblage en modules peut être fonctionnelle (câblage éclairage, câblage sécurité par exemple) ou physique (par exemple câblages arrière, du toit, des portes) comme cela a été présenté au paragraphe (1.3.2.4).

## Résultat

Le résultat de cette phase est une nomenclature de production d'un pack. Cette nomenclature est définie par un ensemble de références de modules du pack.

La décomposition du câblage de la fonction lève-vitres en deux modules (porte conducteur et porte passager) est illustrée par la Figure 1.15.

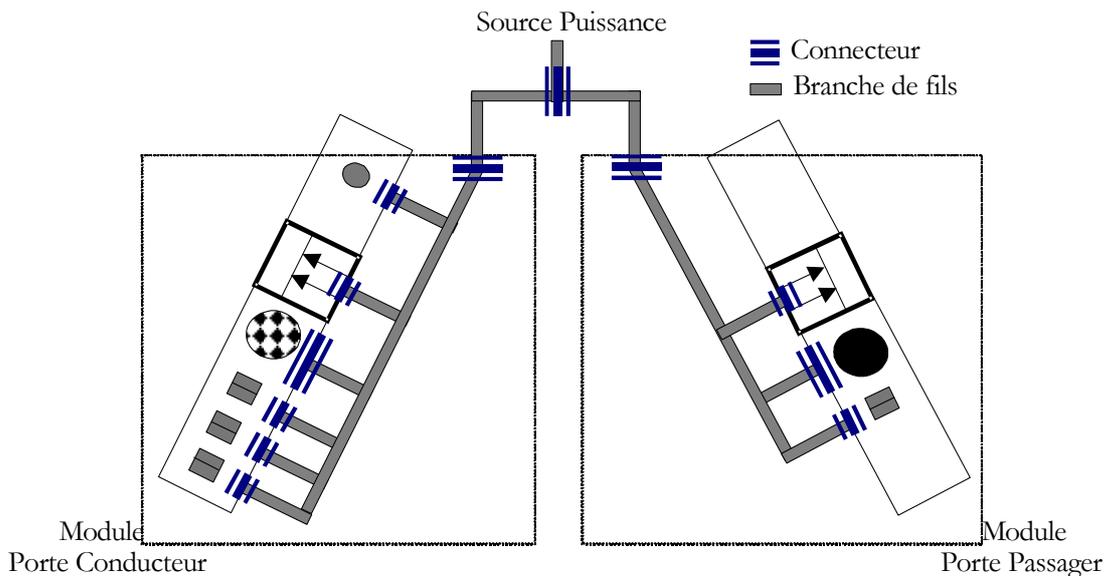


Figure 1.15 – Décomposition du pack lève-vitres en deux modules : conducteur et passager

### 1.3.4.5. Les besoins d'aide

L'analyse des deux premières phases de notre démarche de conception (définition fonctionnelle et définition technologique) met en évidence une diversité importante. Cette diversité est caractérisée par une forte combinatoire dans les choix possibles de fonctions, de sous-fonctions, de composants et de leurs caractéristiques. La difficulté de cette étape concerne la vérification de la cohérence de tous les choix à faire. Pour aider le déroulement de cette étape et pour mieux gérer la diversité du besoin, il est important de capitaliser toutes les connaissances relatives aux définitions fonctionnelle et technologique du produit. Ces connaissances doivent être formulées sous la forme d'un ou plusieurs modèles génériques de produits capables d'assister le concepteur dans ses choix. Ces modèles de connaissances doivent garantir la cohérence des choix à chaque niveau de raisonnement pour limiter les erreurs.

Les phases trois et quatre traitent de l'agencement, du positionnement géographique des composants et de la décomposition du pack en modules. Ces phases sont mises en œuvre par la prise en compte des contraintes géométriques et des connaissances sur des procédures d'agencement et de décomposition. Pour aider le déroulement de cette étape, nous proposons d'exploiter un modèleur tridimensionnel assisté de modèles de connaissances liées à l'agencement de composants et à la décomposition de pack.

### 1.3.5. Résultats de la conception

Au terme de la démarche de conception que nous avons développée, nous obtenons une solution d'un pack qui répond à un segment du besoin total des utilisateurs. Toutefois, notre démarche peut proposer plusieurs solutions de conception d'un pack. Ces solutions diffèrent selon le nombre et les types de références de modules qui découlent de la phase de décomposition, ou selon le choix de composants technologiques.

En outre, pour un câblage d'un modèle de voiture donné, la demande totale peut être répartie sur plusieurs segments de marché (bas de gamme, moyenne gamme, haut de gamme). Chaque segment de la demande peut être satisfait par des packs. Par conséquent, pour obtenir une solution du produit, l'approche que nous avons détaillée doit être appliquée pour la conception de chaque pack identifié.

Sur l'exemple de la Figure 1.16, nous présentons une solution de conception composée de 4 packs. D'autres solutions avec 1, 2 ou 3 packs sont possibles. Nous considérons aussi que notre démarche de conception peut proposer plusieurs possibilités de nomenclature de production pour un même pack soit, pour l'exemple, 3 solutions de décomposition P2.1, P2.2, P2.3 pour le pack P2. Une nomenclature se décompose enfin en modules. Dans l'exemple, la nomenclature de P2.3 comporte les modules 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 et 2.3.4.

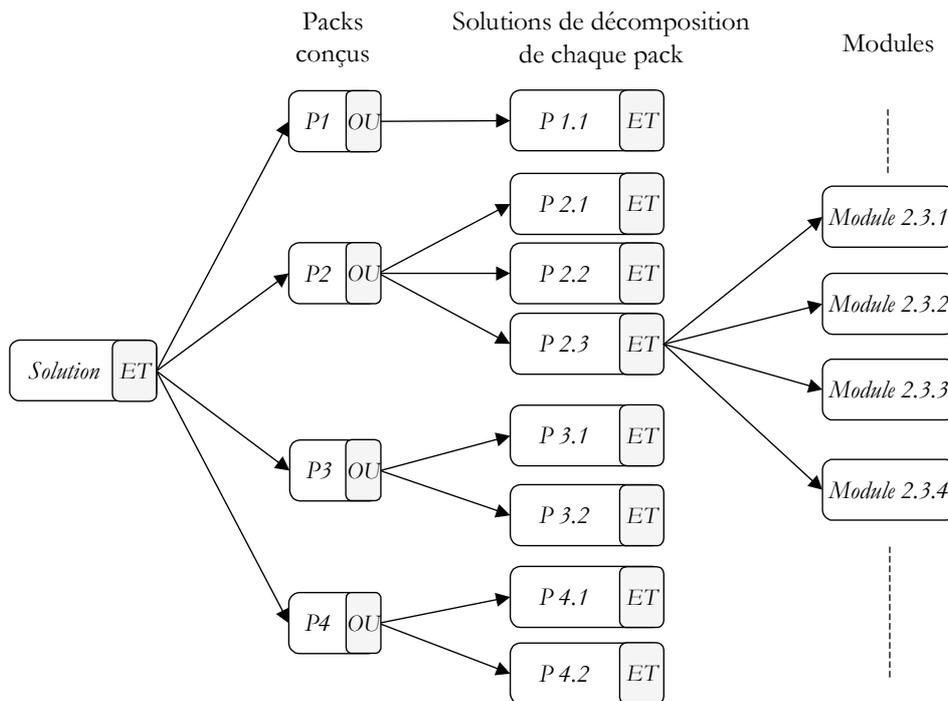


Figure 1.16 – Solutions possibles de conception de packs de câblage

## 1.4. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons développé une démarche de conception routinière de produits à forte diversité du besoin client.

Dans la première partie, nous avons dressé un état de l'art sur l'activité de conception pour situer le contexte de nos travaux. Nous nous sommes intéressés à la conception de familles de produits (plusieurs variantes).

Ensuite, nous avons exposé en détail le terrain industriel qui nous a servi d'application à nos travaux. Nous avons alors défini les différents points de vue du câblage pour l'automobile. Plusieurs types de diversité ont été identifiés pour ce produit : diversités fonctionnelle, technique et processus industriel.

L'analyse des travaux effectués sur la maîtrise de la diversité de produit a fourni un certain nombre de méthodes et d'outils que nous avons classés en trois solutions principales de conception.

La spécificité du produit câblage automobile nous a amené à proposer une démarche globale de conception d'une famille de câblages basée sur la notion de pack.

Ensuite, pour concevoir chaque pack, nous avons proposé une démarche de conception capable de prendre en compte la diversité fonctionnelle du besoin client et la diversité des solutions technologiques. Le déroulement de cette démarche se fait en interaction avec le client. Pour mener à bien cette démarche « multi-phases » de conception, différentes connaissances sont nécessaires. Pour cela, les outils d'assistance que nous présentons dans le chapitre suivant s'appuieront essentiellement sur la capitalisation et la réutilisation des connaissances relatives au produit et à son processus de conception.

Notre démarche de conception, appliquée à la conception de chaque pack, est capable de fournir plusieurs solutions de conception de câblage (ensemble de packs), d'où la nécessité d'une phase d'évaluation.

Bien que nous ayons développé une démarche spécifique pour la préconception du câblage automobile, nous pensons qu'il est tout à fait envisageable d'étendre son application à la conception d'autres produits présentant des caractéristiques de diversité fonctionnelle et technologique similaires à celles du câblage automobile.



# Chapitre 2. Outils d'assistance à la démarche de conception de produits

## 2.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons développé une démarche d'aide à la conception de produits à forte diversité. Nous avons inscrit cette démarche dans le cadre de processus routiniers de conception intégrée dans le sens où les concepteurs s'appuient sur des conceptions antérieures pour modifier ou améliorer des produits existants. Cette démarche classique de conception pose le problème de la disponibilité de la connaissance, relative aux produits et aux stratégies de conception, et sur la capacité des acteurs de conception à capitaliser cette connaissance. L'exploitation de cette connaissance a pour but la réduction des erreurs de conception ou de reconception et, en conséquence, la réduction des délais.

L'objectif principal de ce chapitre est de proposer des outils adéquats pour assister chacune des phases de préconception proposées. Ces outils s'appuient essentiellement sur la réutilisation des connaissances de conception et assurent la cohérence des choix de conception.

Dans la première partie (2.2), nous établissons un état de l'art sur l'ingénierie des connaissances en conception. Nous présentons d'abord un panorama des différents modèles proposés pour formaliser les connaissances produit et processus. Ensuite, nous montrons l'apport des techniques issues de l'Intelligence Artificielle pour modéliser le raisonnement du concepteur. Enfin, nous justifions l'intérêt que nous portons aux approches par contraintes, particulièrement les techniques de propagation et satisfaction des contraintes (CSP), pour assister en général les processus de conception routiniers et en particulier le processus de préconception du câblage automobile.

L'exploitation des approches par contraintes pour résoudre le problème de conception de produits à forte diversité sera abordée dans la section (2.3). Les apports et les insuffisances de ces approches seront évalués pour chacune des phases de conception identifiées dans le premier chapitre. Ensuite, nous évaluons la possibilité d'utiliser des approches par contraintes et des modeleurs tridimensionnels pour assister les différentes phases du processus de conception.

Enfin, la conclusion de ce chapitre (2.4) résume l'importance de combiner un outil à base de contraintes et un modeleur géométrique pour l'aide à la préconception de produits à forte diversité.

## 2.2. Etat de l'art : ingénierie des connaissances en conception

Au terme de la description de la démarche de conception routinière que nous préconisons, nous soulignons l'importance de la disponibilité d'une grande variété de connaissances. Celles-ci concernent à la fois le produit à concevoir et son processus d'obtention.

La première section (2.2.1) présente les principaux modèles produit et processus existants. Dans la seconde section (2.2.2), nous dressons un panorama des principaux outils et approches, issues de l'Intelligence Artificielle, proposés pour modéliser et exploiter les connaissances en conception.

## **2.2.1. Modèles produit et modèles processus de conception**

La capitalisation des connaissances vise à la fois la préservation, le partage et surtout la réutilisation d'un savoir-faire généré au fil des projets de conception. L'effort de capitalisation passe plus concrètement par la modélisation ayant comme objectif de diminuer le temps de conception, en réutilisant ce qui est déjà validé, pour se concentrer uniquement sur les nouveaux choix à gérer pour une nouvelle solution. De nombreux auteurs ont proposé des modèles à base de connaissances visant à la conception routinière. Les travaux les plus récents portent sur la mise au point de modèles génériques de connaissance. Dans sa théorie générale de la conception, [Yoshikawa, 1988] parle de conceptions utiles comme celles qui disposent d'une représentation du produit et du processus de conception.

### **2.2.1.1. Modèles produit**

Un modèle produit décrit les différentes connaissances relatives à un produit. L'ensemble des travaux traitant de la modélisation de produit suggèrent une représentation multi-vues : fonctionnel, structurel, géométrique, physique [Tollenaere, 1994]. La modélisation multi-vues est utilisée pour des raisons à la fois de complexité des produits et de diversité des connaissances issues de divers métiers. Dans tous les cas, le concepteur est confronté au problème de cohérence des connaissances relatives au produit. Il est donc indispensable de renforcer ces modèles par des formalismes assurant la cohérence des connaissances. Dans ce qui suit, nous présentons un panorama des modèles produit. Une synthèse plus détaillée des principaux modèles de produit est résumée dans [Bernard, 2000].

### **Les modèles produit orientés intégration métiers**

[Belloy, 1994] a proposé un modèle produit qui intègre les connaissances métiers. Le modèle traduit une description de produits en utilisant le concept d'entités de peau et de squelette. Les entités de peau sont spécifiées par la connaissance des experts. Elles sont assimilées aux surfaces fonctionnelles qui composent les pièces et permettent de définir une géométrie nominale du produit. L'entité squelette correspond aux flux de matière qui relie les entités de peau et qui permet de localiser la position matérielle de la pièce.

[Tichkiewitch, 1996] propose un modèle produit multi-vues permettant la coopération entre les acteurs de la conception. Ce modèle est construit de façon à stocker, dans une même base, tous les éléments utilisés par chaque métier et leurs interactions. Chaque acteur rajoute une contrainte liée à son métier. Ce modèle permet de structurer et d'associer des composants dans un système par la spécification des différents liens. Un lien correspond à une caractéristique externe du composant et les relations expriment les liaisons entre les liens. Trois règles sont associées à ce concept : une règle de composition/décomposition pour représenter les détails des composants, une règle de substitution pour remplacer une relation entre liens par un ensemble composant-lien-relation et enfin une règle de représentation multi-vues. Pour définir le produit, chaque acteur se connecte à la base commune et dispose ainsi de bibliothèques d'entités (composant, lien, relation) et d'un jeu de règles spécifiques à son métier.

## Les modèles produit orientés fonctions

Un modèle produit orienté fonctions est exploité pour interagir avec le client et satisfaire ainsi son besoin. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux représentations fonctionnelles du produit [Umeda *et al.*, 1990] [Andreasen, 1991] [Dupinet, 1991] [Constant, 1996] [Yannou, 1998].

Pour faciliter le passage de l'expression du besoin à la définition du produit, [Dupinet, 1991] a proposé d'utiliser des graphes pour représenter le produit. Plusieurs graphes ont été construits pour intégrer les fonctions, l'architecture et les choix technologiques : le "graphe logique" pour représenter les fonctions du produit, le "graphe technologique" pour représenter les contacts entre les surfaces fonctionnelles et le "graphe produit" pour vérifier la cohérence des deux premiers graphes. Les graphes sont utilisés pour spécifier les éléments du modèle produit : entité, fonction, frontière, composant et contrainte. L'entité est définie comme l'objet le plus élémentaire, la fonction exprime l'interaction entre des entités, la frontière est constituée d'un ensemble d'entités qui interagissent avec l'environnement du produit, le composant est un assemblage d'entités et la contrainte traduit toutes les dépendances et relations entre les éléments.

[Constant, 1996] propose de compléter l'approche graphe produit de façon à ce que le modèle prenne d'abord en compte les fonctions à satisfaire et d'intégrer ensuite un continuum entre les aspects structurel et fonctionnel. Pour fournir une description formelle des spécifications, le modèle s'appuie sur le concept de flux physique qui traverse les surfaces fonctionnelles. Un composant est identifié par ses frontières constituées de surfaces fonctionnelles. Le modèle distingue trois classes de fonctions : principales, dépendantes et auxiliaires. La Figure 2.1 présente un exemple de représentation fonctionnelle d'un disque frein. Les lettres montrent les liens pouvant être traversés par un flux, alors que les nombres indiquent les surfaces qui y sont impliquées. Pour modéliser un produit, une approche sur trois niveaux est utilisée. Le système est d'abord isolé de son environnement par la définition des frontières, ensuite les actions dans lesquelles doit intervenir le produit sont identifiées et enfin, le produit est décomposé en sous-produits pour définir sa structure interne.

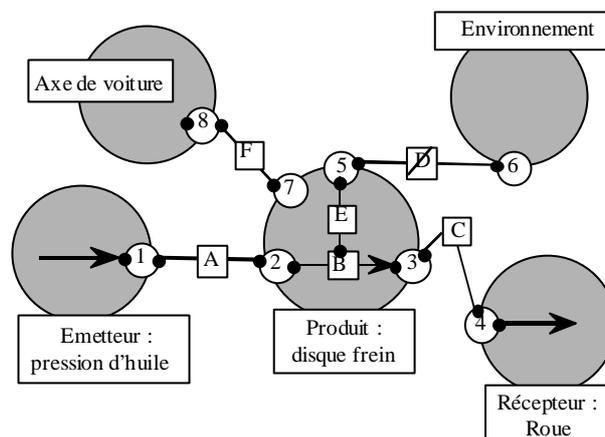


Figure 2.1 – Modèle fonctionnel du disque frein [Tollenaere et Constant, 1997]

S'inspirant des concepts introduits par Dupinet, [Eynard, 1999] propose un modèle produit pour décrire les projets de conception en termes d'objectifs à atteindre. Le formalisme proposé est constitué de quatre éléments : fonctions, contraintes métiers, entités technologiques et entités frontières. Les fonctions définissent les objectifs de la conception. Une fonction, définie par des paramètres et des contraintes, établit la relation entre deux entités technologiques. Une entité technologique est spécifiée à partir de la fonction par une identification des entités frontières.

Une contrainte métier limite le domaine de variation des paramètres des entités frontières d'une fonction donnée selon un point de vue. L'entité technologique est un objet conceptuel en cohérence avec la fonction. Elle est caractérisée par des paramètres et ses entités frontières. L'entité frontière assure l'interface entre la fonction et l'entité technologique. Ce modèle produit évolue progressivement d'un état de connaissance à un autre et en fonction de l'état obtenu, des décisions sont prises par le concepteur. Chaque état est identifié par ses fonctions, ses entités frontières et technologiques, une application qui associe à chaque fonction un couple d'entités technologiques, et une application partielle qui associe à chaque couple (fonction, entité technologique) une seule entité frontière.

### **Modèles orientés capitalisation et réutilisation des connaissances**

[Harani, 1997] a développé un modèle produit pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances. Il est destiné à représenter toutes les informations liées à un produit conçu ou à concevoir. Le modèle est construit sur trois niveaux conceptuels. Le niveau d'abstraction est défini par un méta-modèle où tous les concepts de base sont définis. Ensuite, le concepteur élabore la conception spécifique à son domaine qui génère le modèle de produit spécifique à exploiter au dernier niveau de réalisation. Le modèle est structuré de manière à permettre la définition du produit à partir des spécifications extraites du cahier des charges, à maintenir à jour la connaissance produit et à conserver l'historique de conception à des fins de réutilisation. Les informations du modèle sont contenues dans les concepts : produit, paramètre et point de vue. Le concept produit est introduit pour caractériser les descriptions initiales du produit, pour récupérer les informations relatives à un produit déjà conçu et pour spécifier la structure qui va ensuite recevoir toutes les informations à conserver lors de la conception d'un produit. Pour cela, il est relié aux deux autres concepts paramètre et point de vue. A travers le concept paramètre sont représentées les spécifications quantitatives. Elles sont soit imposées par le cahier des charges, soit calculées durant le processus de conception. Le concept point de vue est introduit pour prendre en compte les différentes perceptions qu'ont les concepteurs du produit (fonctionnel, comportemental et structurel).

[Menand, 2002] a développé un méta-modèle produit pour formaliser la connaissance relative à un produit. Un référentiel métier est proposé au travers de ce méta-modèle dans un contexte de conception multi-acteurs, multi-projets et multi-sites. Les connaissances relatives au produit sont contenues dans quatre concepts : fonction, situation de vie, article et paramètre. Le modèle est composé de trois niveaux d'abstraction. Au plus haut niveau, le modèle générique permet de décrire la connaissance générique de conception. L'instanciation de ce modèle constitue le modèle du niveau domaine décrivant la connaissance propre à un domaine. Enfin, après instanciation de ce dernier, le modèle projet permet de décrire la connaissance du niveau projet. Le modèle projet permet la capture des résultats et de l'historique du déroulement d'un projet. Le méta-modèle permet de formaliser le produit avec ses fonctions et ses situations de vie et de garder une trace des contraintes rencontrées en conception et des choix effectués en conséquence. Enfin, après la composition des deux référentiels domaine et projet, le référentiel métier est obtenu par double instanciation (pour le domaine et le projet) du référentiel de conception générique. Le méta-modèle est élaboré avec une approche UML (Figure 2.2).

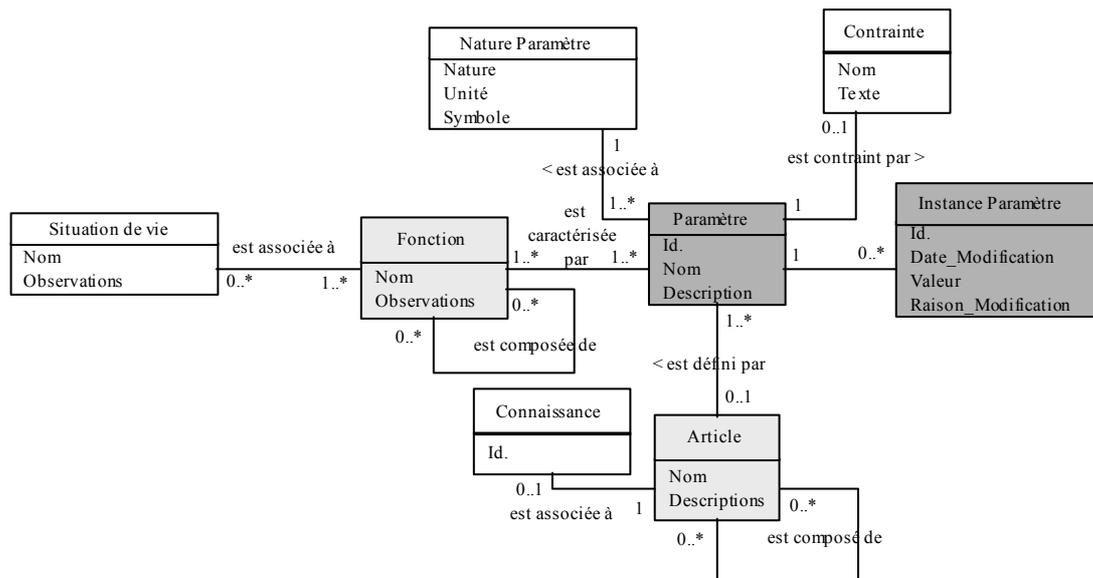


Figure 2.2 – Modèle Produit [Menand et Tollenaere, 2001]

### Modèles produit multi-vues

[Vargas, 1995] et [Saucier, 1997] proposent un méta-modèle multi-vues permettant la description d'une famille de produits. L'objectif principal est d'intégrer le point de vue géométrique au même titre que d'autres points de vue. Ils proposent d'intégrer dans un même modèle les aspects fonctionnel, physique et géométrique du produit. Le modèle fonctionnel permet de représenter une décomposition arborescente des fonctions que peut satisfaire une classe de produits. Les nœuds de l'arbre décrivent les fonctions, les fonctions élémentaires ou les solutions techniques, et les feuilles correspondent aux entités. Les arcs de l'arbre supportent des liens de décomposition fonctionnelle et des liens sémantiques. Le modèle fonctionnel est établi à partir des connaissances conceptuelles disponibles. A partir de ces fonctions, les solutions techniques sont répertoriées et les entités définissant les solutions techniques sont paramétrées. Le modèle physique définit la décomposition structurelle des variantes de la classe de produits. Il repose sur une décomposition arborescente qui a pour nœuds intermédiaires des assemblages, des assemblages élémentaires ou des pièces, et pour feuilles des entités. Les arcs décrivent les liens sémantiques pouvant être obligatoires ou optionnels. Cet arbre est obtenu à partir des données techniques (nomenclatures). Les entités définissent l'interface entre les deux modèles. Elles représentent les parties constitutives des pièces. En effet, si le concepteur souhaite réutiliser une pièce existante, les fonctions sont instanciées à partir des entités de cette pièce et s'il décide de travailler sur les fonctions, la pièce se construit progressivement par les entités identifiées dans le modèle fonctionnel. Le modèle géométrique est utilisé pour représenter chaque objet par des éléments géométriques élémentaires que peuvent fournir les modeleurs CAO.

Dans un souci d'expressivité maximum, [Yvars, 2001] a proposé une évolution du modèle de Saucier. Le méta-modèle produit proposé s'articule autour de trois points de vue de base : structurel, fonctionnel et géométrique (Figure 2.3). Pour décrire une classe de produits, les trois modèles de départ utilisent des mécanismes de contraintes. Les contraintes définissent les relations d'agencement des composants et les diverses configurations d'un produit. Pour rendre explicite la connaissance relative aux choix de variantes, le concept de connecteurs sur relations est introduit. Les connecteurs sont des méta-contraintes portant sur d'autres contraintes. Elles conditionnent l'existence des entités et l'association d'autres. Les entités contiennent elles-mêmes des contraintes. Elles sont gérées par un moteur de propagation. Un exemple de modèle d'un ensemble Bielle-Piston est présenté dans [Yvars, 2001].

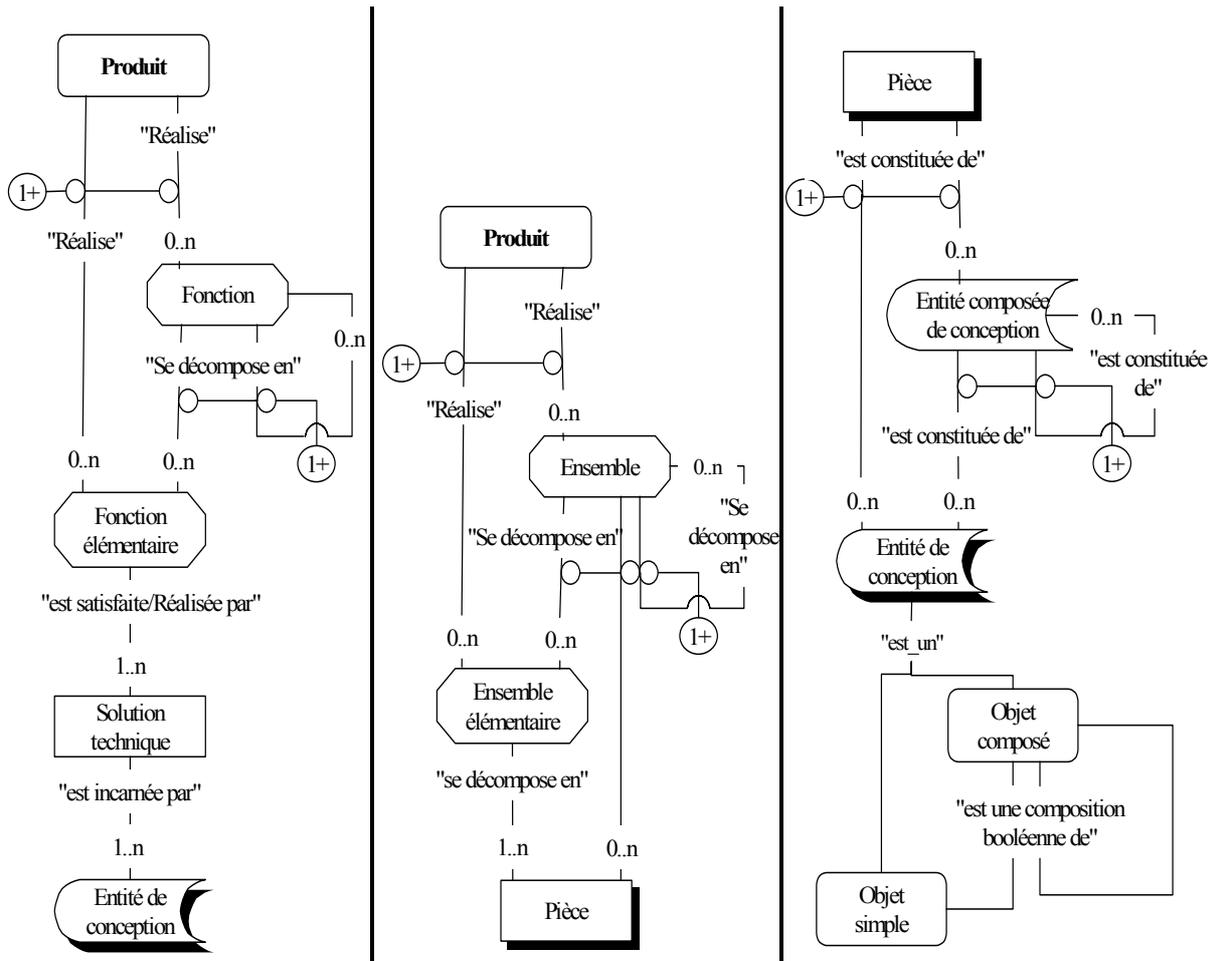


Figure 2.3 – Modèles Produit [Sellini, 1999] [Yvars, 2001]

Les travaux du projet SHOOD [Tollenaere, 1995] proposent une modélisation structurelle et fonctionnelle du produit. Ce modèle utilise deux types d'entités : les fonctions et les éléments structurels. Le modèle proposé est présenté sous forme d'une matrice avec deux axes perpendiculaires : un axe horizontal pour la décomposition fonctionnelle et un axe vertical pour la décomposition structurelle (Figure 2.4). Le but principal est de représenter explicitement les liens entre fonction et structure. Une fonction peut nécessiter plusieurs éléments structurels et un élément structurel peut contribuer à plusieurs fonctions.

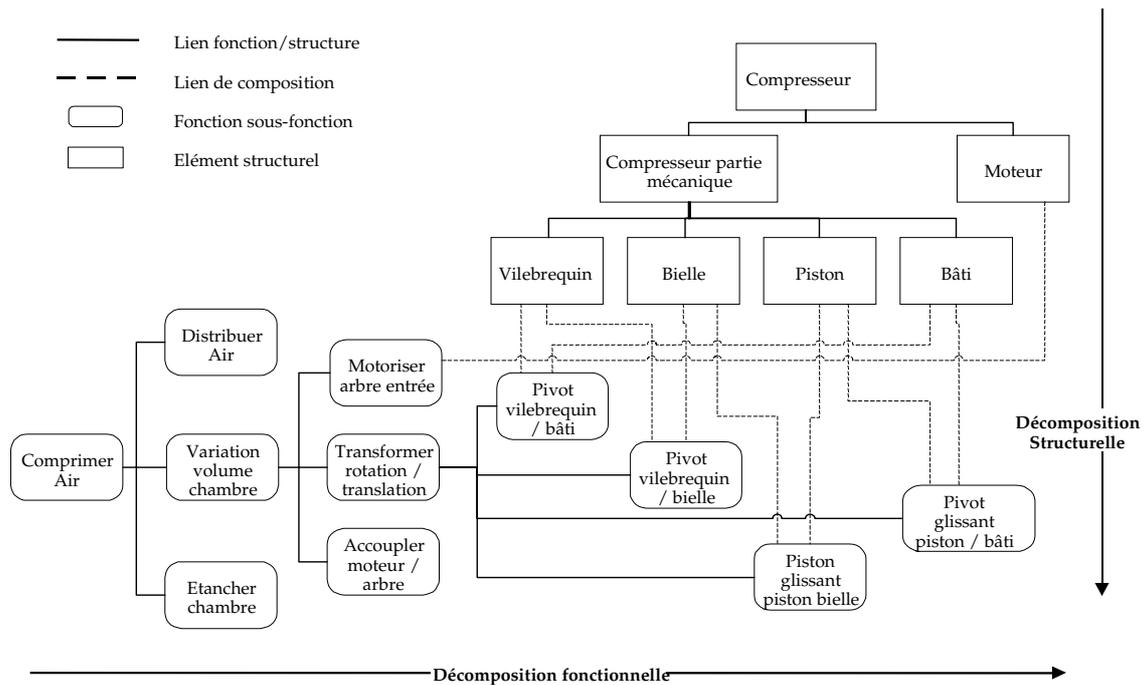


Figure 2.4 – Modèle du produit Compresseur [Tollenaere, 1995]

### 2.2.1.2. Modèles processus de conception

La plupart des concepteurs présentent leur démarche de conception par un enchaînement de tâches mettant en évidence les étapes de l'activité de la conception. La définition d'un modèle processus de conception consiste à spécifier et à guider l'évolution des états du modèle produit le long du projet pour aboutir à un produit spécifique. Il consiste également à décrire les flux d'information traversant les différentes représentations du produit. L'objectif du modèle processus est de modéliser, mais aussi d'instancier et d'exécuter des processus établis pour la conception. Nous présentons dans ce qui suit quelques principaux modèles processus de conception.

#### Les modèles Etat-Transition

A son modèle produit, [Dupinet, 1991] associe un modèle processus de conception. Le processus est segmenté en états de conception correspondant à l'ensemble des informations présentes dans le modèle produit avant qu'intervienne un nouveau choix du concepteur. Chaque choix est assimilé à une transition entre deux états de conception. Le processus de conception est décomposé en cinq phases : l'élaboration et la transcription du cahier des charges, l'analyse fonctionnelle et technique du produit, la conception des détails, l'optimisation après choix de fonction, et enfin la simulation, pour visualiser le comportement du système. Au graphe produit, l'auteur associe un graphe "état-transition" pour mémoriser les choix justifiés tout au long du processus. Pour gérer le modèle produit, des mécanismes ont été définis : un mécanisme de recherche de solution qui correspond à la sélection de composants basée sur la logique, un mécanisme d'instanciation généralisée permettant à chaque objet d'avoir des caractéristiques différentes des autres, et un mécanisme de raffinement consistant à affiner la connaissance d'un composant en fonction des exigences technologiques et enfin le mécanisme de parcours de graphes.

## Modèles pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances

[Harani, 1997] a proposé un modèle multi-niveaux de processus de conception. L'objectif est de fournir les supports adéquats à la formalisation de tout processus, d'aider à spécifier les étapes de conception et de pouvoir conserver le savoir des concepteurs en gardant une trace de leurs raisonnements. Les informations du modèle processus de conception sont contenues dans trois composantes couvrant les concepts : processus de conception, tâche, ressources et état. Le concept processus de conception représente un enchaînement de tâches de conception mettant en évidence les étapes clés de l'activité de conception. À l'aide de ce concept tâche sont définies toutes les tâches de conception. Une tâche peut être élémentaire ou décomposable en un ensemble de sous-tâches. L'exécution d'une tâche se fait à partir de ressources de conception regroupées dans le concept ressources (logiciel ou méthode de calcul par exemple). Le concept état est défini pour conserver les états d'exécution du processus de conception et ceux des tâches. La notion de produit n'a de sens qu'au travers du processus qui le conçoit de même que le processus de conception porte sur la dynamique d'un produit. Pour cela et afin d'assurer la cohérence de l'approche générique, un couplage entre le modèle de produit et le modèle de processus est proposé.

### Les modèles graphe d'état du processus

[Ouazzani, 1999] a proposé une méthode SAGEP<sup>1</sup> pour modéliser dynamiquement le processus de conception. C'est une représentation multi-niveaux, développée dans une perspective d'acquisition et de capitalisation des historiques de conception. La décomposition de la conception est utilisée pour faire apparaître la dynamique qui existe entre les objectifs et les états du processus de conception. La structure d'objectifs est utilisée pour décrire et sauvegarder la décomposition et le raffinement des objectifs de conception. Chaque objectif est caractérisé par son existence, sa nature, sa valeur et son statut. La structure d'objectifs est modélisée par un arbre. Les nœuds représentent les objectifs et sous-objectifs de la conception et les arcs décrivent les liens de décomposition ou de raffinement. La structure d'objectifs est couplée à un graphe d'état de conception. Le graphe d'état permet de décrire le processus de conception d'une manière dynamique et hiérarchique. Le processus de conception est défini alors comme une suite d'états qui définissent, à un niveau donné du processus, les objectifs courants ainsi que leur statut. Le changement d'état signifie soit la réalisation ou le changement d'un ou plusieurs objectifs. Les états successifs sont reliés par des sessions. Une session est une représentation agrégée d'actions physiques (relatives au produit : génération, instanciation) ou de gestion (relatives au processus : choix, validation).

### Les modèles génériques multi-projets

[Menand, 2002] propose, au travers d'un méta-modèle, une structuration de référentiel métier générique. Le méta-modèle processus de conception formalise les données et connaissances génériques du processus et de ses tâches. Ce méta-modèle est composé de méta-classes concernant le domaine et le projet sur lequel le processus de conception se déroule. Le méta-modèle processus est décomposé en deux modèles. Le modèle domaine est obtenu par l'instanciation du méta-modèle générique et constitue un référentiel métier générique du domaine. Le modèle domaine est à son tour instancié sur chaque projet. Le modèle projet comporte l'historique du projet. Le modèle du processus offre une sémantique qui permet de capturer les informations relatives au processus et les flux d'information entre acteurs. Des éléments de ce modèle sont partagés avec les éléments du modèle produit. Les tâches du processus sont

---

<sup>1</sup> SAGEP : Système d'Aide à la GEstion du Processus

associées aux fonctions du produit. Le méta-modèle processus de conception est utilisé pour définir les paramètres du méta-modèle produit. En effet, les classes paramètres sont communes aux deux modèles et les instances paramètres sont associées aux instances tâches.

### Les modèles graphe du processus de conception

Le modèle processus de [Vargas, 1995] a pour but de formaliser la connaissance de manière déclarative et permet de représenter la suite de tâches à effectuer. Il est composé d'un ensemble de tâches (problèmes à résoudre), d'un ensemble de méthodes (manières de résoudre des tâches) et d'un ensemble de méthodes élémentaires (calculs et dialogues avec l'utilisateur). Les tâches et les méthodes sont organisées sous la forme d'un graphe ET/OU (Figure 2.5). Cet arbre fournit une structure détaillée des problèmes à résoudre. Chaque tâche contient plusieurs méthodes et chaque méthode peut être dédiée à une ou plusieurs tâches. La mise en œuvre du modèle processus de conception nécessite deux étapes : la définition statique qui correspond à l'identification et la hiérarchisation des problèmes à résoudre, et la définition dynamique, qui décrit le comportement du modèle par des algorithmes de résolution des tâches. Pour instancier les modèles produit, le raisonnement du concepteur est modélisé sous forme de stratégies de résolution. Par l'intermédiaire du modèle processus, le concepteur est amené à faire des choix d'une tâche, d'une méthode et de valeurs pour un composant. Chaque choix est alors soumis à un ensemble de contraintes. Le formalisme proposé est basé sur la propagation de contraintes. Les contraintes de structure sont utilisées pour modéliser les relations booléennes de l'arbre tâches/méthodes, les contraintes de résolution pour limiter les valeurs possibles des paramètres de chaque composant et les contraintes intervenant en cours du processus et qui ne sont activées que lorsque la méthode qui les contient est sélectionnée. Les valeurs des paramètres peuvent être sélectionnées par une heuristique ou calculées par un algorithme. Les méthodes sont également choisies par une heuristique ou en fonction de certaines priorités prédéfinies. Dans le cas où un choix s'avérerait incohérent, le mécanisme de retour arrière (backtrack) est utilisé.

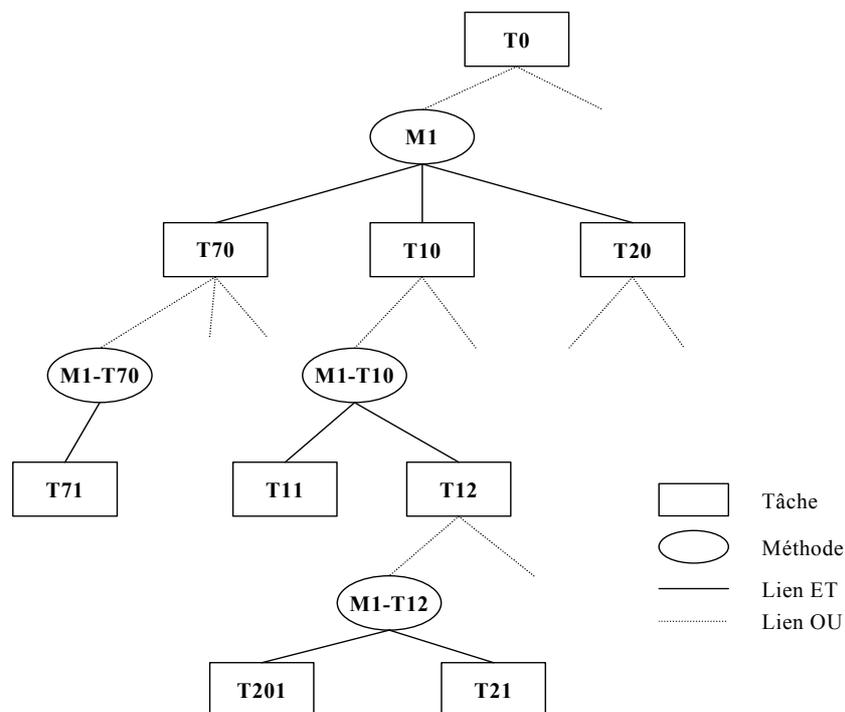


Figure 2.5 – Arbre tâches/méthodes [Vargas, 1995]

Une extension de ce modèle a été introduite par [Lenguin, 1996] [Sellini, 1999] et [Yvars, 2001]. Pour modéliser le processus de conception, ils ont établi une analogie entre les notions utilisées au sein du méta-modèle produit et la représentation du processus de conception. Les connaissances de stratégie de conception sont modélisées de façon déclarative par des connecteurs qui peuvent être posés entre les tâches et les méthodes. Les connecteurs logiques affectent l'état des tâches modélisées par des relations logiques (et, ou, implication) et les connecteurs temporels modélisent l'ordre d'exécution des tâches et méthodes par des relations de précédence, de parallélisme, de synchronisation et d'initialisation.

## **Bilan et positionnement**

Les différents modèles produit que nous avons détaillés précédemment ont tous comme objectif commun d'être un support de formalisation des connaissances relatives au produit et de les mettre à disposition de tous les acteurs de la conception. Dans ces modèles, un ou plusieurs aspects du produit (fonctionnel, physique, structurel, géométrique) ont été positionnés dans des contextes différents (capitalisation et assistance, réutilisation, multi-métiers, multi-projets). Ces modèles supportent une ou plusieurs phases du processus de conception et facilitent le passage du besoin client aux définitions fonctionnelle, physique, et géométrique. L'évolution de ces modèles étend les niveaux de connaissances prises en compte à la fois vers l'amont, par l'intégration des approches fonctionnelles et la prise en compte du besoin des clients, et vers l'aval, par l'intégration des dimensions fabrication, assemblage et logistique.

La modélisation produit que nous proposons dans cette étude s'inscrit dans la continuité de l'évolution de ces modèles. En effet, nous nous intéressons plus particulièrement à formaliser les connaissances produit pour que sa définition soit cohérente du premier coup et qu'elle soit en interaction avec le client. Ces modèles nous servent de référence pour identifier, structurer et spécifier toutes les fonctions du produit et les composants qui le constituent. Nous nous inspirons particulièrement de l'approche de modélisation produit par contraintes proposée par (Vargas, Saucier, Sellini et Yvars). Les modèles produit multi-vues (fonctionnel, physique et géométrique) basés sur les contraintes que nous proposons sont des modèles génériques capables de représenter une famille de produits avec toutes ses variantes et options possibles. Ceci permettra de prendre en compte et de gérer avec cohérence la diversité du besoin. Par conséquent, le processus de conception pourra se dérouler en forte interaction avec le client.

Les approches de modélisation du processus de conception se focalisent sur la capitalisation et la réutilisation des connaissances relatives au déroulement des processus de conception routinière. Ces modèles permettent de spécifier le raisonnement que doit suivre un concepteur pour exploiter les modèles produits proposés. Le souci majeur d'un concepteur est d'arriver à définir une instance d'un produit en cohérence avec le besoin client et les contraintes métiers. En plus des représentations produit que nous proposons, la manière de les exploiter s'impose. Les approches par contraintes proposées ne sont donc pas seulement utilisées pour formaliser les connaissances produit mais également explicitées pour représenter le processus d'instanciation de ces modèles. Elles assurent la cohérence des choix du premier coup et le passage consistant d'une représentation à une autre.

### **2.2.2. Le domaine de l'Intelligence Artificielle appliqué à la conception**

Le but principal de l'Intelligence Artificielle (IA) est de simuler des processus du raisonnement humain. Considérant l'activité de conception comme une activité intellectuelle et cognitive basée sur les connaissances, il est tout à fait normal que beaucoup de chercheurs se soient intéressés au

traitement des problèmes de conception par les approches IA. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs cadre de modélisation ont été proposés [Maher et Gero, 1990]. Nous synthétisons principalement le raisonnement à base de cas (case-based reasoning, CBR), le raisonnement à base de règles (rule-based reasoning, RBR), et le raisonnement à base de contraintes (constraint satisfaction problems, CSP),

Du point de vue IA, concevoir un produit consiste à résoudre un problème par cheminement d'un état initial vers un état final dans un espace de contraintes pour satisfaire un but [Braha et Maimon, 1997]. Les contraintes intervenant en conception sont multiples et elles peuvent être formulées sous forme de règles, de formules de calcul et d'algorithmes. La conception est, par sa démarche, un processus impliquant un nombre important de connaissances expertes variées. De plus, c'est un problème qui ne relève pas seulement de l'optimisation, car une ou plusieurs solutions acceptables et satisfaisantes peuvent être recherchées.

Les applications de l'Intelligence Artificielle à l'aide à la conception ont évolué vers la prise en compte des problèmes liés à la connaissance en conception. Les règles de production, initialement utilisées, ont été enrichies par les modèles objet, les raisonnements à base de cas, la programmation et la propagation de contraintes et la modélisation produit-processus.

### 2.2.2.1. Systèmes à base de règles

L'objectif principal d'un système à base de règles est de reproduire le raisonnement d'un expert humain pour une tâche donnée par la capitalisation et la formalisation des connaissances expertes. Le système devra être capable de déduire et de faire des conclusions. Un système à base de règles est défini par deux modules : une base de connaissances fournies par l'expert et un moteur de règles, utilisé pour manipuler la base de connaissances et déduire des conclusions.

La base de connaissances comporte deux types de connaissances : des faits et des règles. Les faits sont des connaissances intangibles propres à un problème à résoudre. La base de faits est enrichie de faits nouveaux appris ou conclus pendant le raisonnement. Les règles constituent les connaissances relatives à un domaine. Elles sont modélisées sous la forme d'un ensemble de règles de production ayant comme structure de base [Lévine et Pomerol, 1989] : *SI* <Conditions> *ALORS* <Conclusion>. Les règles permettent de déduire des faits à partir d'autres faits. Le moteur de règles est le mécanisme permettant de déclencher les règles sur les faits pour déduire de nouveaux faits. Dans les systèmes basés sur la logique, le moteur applique une stratégie de recherche et une méthode de chaînage (avant, arrière, mixte) pour l'application des règles. Le raisonnement effectué est basé sur la logique appliquée à sa base de connaissances : logique d'ordre 0 (calcul des propositions), logique d'ordre 1 (calcul des prédicats) ou logiques d'ordre supérieur à 1. La difficulté essentielle n'est pas dans les déductions mais dans la structuration et la représentation formelle des connaissances.

SMECI [SMECI, 1991] est un système à base de règles, développé pour être un outil d'aide à la conception. Il permet de décomposer un problème de conception en tâches, d'associer à chaque tâche des paramètres et des règles, de contrôler et gérer l'ordonnement des tâches. L'environnement de SMECI offre une représentation en classes d'objets décrites par un ensemble de connaissances. Sa base de règle de production est écrite en logique des prédicats. Il est capable d'effectuer un raisonnement hypothétique en utilisant des contextes parallèles nommés états. Un état est défini par l'ensemble des valeurs des champs de tous les objets. La succession de ces états forme un arbre, dont la racine est l'état initial du raisonnement, et les feuilles sont soit des solutions, soit des impasses pour le problème traité. Cet arbre d'état sert également d'historique du raisonnement de conception, c'est grâce à lui que l'on pourra bâtir des explications ou établir des comparaisons. Une particularité de SMECI est qu'il n'enregistre que des transitions : affectation d'une valeur, création ou destruction d'objets. Un état est donc

entièrement déterminé par son père et l'ensemble des transitions par rapport à ce père. Le passage d'un état à un autre se fait par un mécanisme de faire/défaire, en parcourant l'arbre des états. Cette technique peut se révéler assez coûteuse si l'on désire basculer entre deux états très distants dans l'arbre.

### 2.2.2.2. Systèmes à base de cas (CBR pour Case-Based Reasoning)

C'est une approche de résolution de problèmes basée sur la réutilisation par analogie d'expériences passées appelées cas [Kolodner, 1993] [Aamodt et Plaza, 1994]. Un cas est indexé pour permettre de le retrouver suivant des indices qui déterminent dans quelle situation un cas peut être de nouveau réutilisé. Un système CBR est doté d'une base de cas ainsi que de mécanismes lui permettant de comprendre des situations nouvelles à la lumière d'expériences antérieures, d'adapter les solutions fournies en référence au problème posé et d'évaluer la qualité de la solution proposée. Ce type de raisonnement est bien adapté aux domaines et aux situations où il n'existe pas de théorie ou de modèle formalisé, et où le rôle de l'expérience est prédominant. Un des avantages souvent cité en faveur du CBR est qu'il opère à un haut niveau d'expertise sans s'occuper des modèles théoriques.

Le raisonnement à partir de cas se décompose habituellement en quatre phases principales.

- remémoration : étant donné un problème à résoudre (cas-cible), la remémoration consiste à retrouver dans la base de cas un ou plusieurs cas-source ayant des similarités avec le cas-cible. Elle se fait par des techniques de recherche d'information, d'indexation, de mesures de similarité,
- adaptation : elle consiste à construire une solution au cas-cible par transformation du cas-source identifié en un cas-adapté au problème courant. Elle nécessite des techniques liées à l'analogie,
- révision : cette étape consiste à affiner le cas-adapté grâce à un processus de correction et d'évaluation,
- mémorisation : elle consiste à mettre à jour la base de cas en y intégrant le cas-adapté pour de futures réutilisations. La mémorisation est mise en œuvre par des techniques d'apprentissage.

Le raisonnement à base de cas est aussi utilisé lorsque différents points de vue sont en compétition, et que les experts eux-mêmes utilisent des cas concrets dans leur argumentation. Les problèmes qui se posent en CBR sont liés à la représentation des connaissances.

Dans le domaine de la réutilisation des connaissances pour la conception, un cas peut être identifié par l'association d'un cahier des charges, de la structure solution de la conception, et du contexte dans lequel la conception a eu lieu. Les cas sont capitalisés dans des situations de conception routinière et certaines situations d'innovation. Pour concevoir un produit, défini par un nouveau cahier des charges et un autre contexte, la base de cas de conception est explorée pour trouver une solution de base, souvent partielle. Généralement, le nouveau cahier des charges et le contexte définissent un index qui est comparé aux index de la base de cas pour trouver les cas les plus proches.

Une série de travaux ont fortement influencé la manière dont les problèmes de conception sont abordés avec le CBR. Une synthèse de ces travaux est faite dans [Maher *et al.*, 1995] qui pose le principe de trois formes de connaissances : un modèle de décomposition de problèmes en sous-problèmes, un modèle de description d'épisodes de conception qui correspondent à la résolution de sous-problèmes, et un modèle d'adaptation sous forme de règles de transformation de formes.

La conception est une activité pour laquelle l'expérience joue un rôle plus important que la connaissance théorique ou formelle dans la génération des alternatives de conception. Ceci explique l'intérêt croissant que porte les concepteurs aux techniques CBR pour assister et/ou automatiser certaines phases du processus de conception. Cependant, le CBR seul ne répond pas à tous les besoins d'aide à la conception. [Maher, 1998] présente le CBR seulement comme un cadre pour la conception qui n'intègre pas les techniques de représentation et d'adaptation : la représentation et la remémoration des cas de conception nécessitent une analyse complète du domaine de conception. L'adaptation des conceptions antérieures nécessite à la fois les connaissances propres à un cas et les connaissances génériques. [Maher, 1998] propose de coupler le cadre CBR avec d'autres techniques IA pour supporter les différentes phases du cycle CBR. Les techniques d'extraction de connaissances sont employées pour assister la phase de construction de la connaissance par des généralisations à partir de cas. Les algorithmes génétiques sont ensuite utilisés pour générer des solutions de conception par combinaisons de cas de conception (adaptation de plusieurs cas).

### 2.2.2.3. Systèmes à base de contraintes

Le raisonnement à base de contraintes est un ensemble d'approches utilisées pour rechercher des valeurs à des variables "contraintes" entre elles. Les approches par contraintes ont réellement commencé à être étudiées il y a une dizaine d'années, bien que les premiers travaux théoriques aient vu le jour il y a plus de vingt ans [Freuder, 1978] [Macworth, 1977] [Montanari, 1974].

Les approches par contraintes sont un ensemble de techniques pour résoudre un problème mathématique en le formalisant sous la forme d'un ensemble de variables reliées par un réseau de contraintes.

Il existe de nombreuses approches basées sur les contraintes utilisables dans des domaines particuliers. Elles sont définies par trois aspects [Jegou, 1991] :

- le domaine sur lequel portent les variables considérées : les variables peuvent être réelles, entières, booléennes, symboliques,
- le type de contrainte : équation linéaire, inéquation, équation booléenne de la logique des propositions et/ou des prédicats, contrainte symbolique, contrainte formelle,
- la méthode de résolution utilisée : propagation de valeurs, relaxation, transformation de graphe, systèmes de résolutions d'équations.

Une contrainte est une relation entre un ou plusieurs objets. Un objet peut être une variable numérique ou symbolique. Nous pouvons citer par exemple les contraintes numériques, symboliques, booléennes, ensemblistes et les contraintes géométriques.

Au-delà de la relation qu'elle impose entre des variables, une contrainte est une forme de connaissance. Formuler une contrainte, c'est exprimer une connaissance. Etablir l'ensemble des contraintes qui interviennent dans la résolution d'un problème, c'est capitaliser le savoir-faire.

La spécificité des approches par contraintes est qu'elles opèrent, en cours de résolution, une réduction du domaine de définition initial des variables de manière consistante et cohérente vis-à-vis du système de contraintes. Cette caractéristique permet de traiter des problèmes à forte combinatoire.

Dans le domaine de la conception de produits, les contraintes traduisent les différentes relations entre les différentes caractéristiques d'un produit (fonctions, sous-fonctions, composants, paramètres ou encore les gammes de fabrication). Les approches par contraintes prennent en

charge la gestion de la cohérence des variables et des contraintes de conception et permettent aux concepteurs d'automatiser certaines tâches routinières de conception pour se consacrer uniquement à des tâches innovantes. Ces approches ne prennent pas seulement en compte la connaissance sur le produit mais aussi la connaissance liée au raisonnement des concepteurs. En menant des raisonnements cohérents, le concepteur est, par la suite, à même de prendre les meilleures décisions.

La caractéristique de réduction du domaine initial des variables rend les approches par contraintes privilégiées pour la préconception de produits [Brown, 1998a]. En effet, elles permettent au concepteur, au fur et à mesure que ses choix de conception déclenchent d'autres choix, de réduire la variabilité de ces derniers. La formalisation des connaissances par un réseau de contraintes fournit au concepteur, à tout moment du processus de conception, une vision globale, cohérente et riche de l'état des choix restants.

Pour la préconception, les approches par contraintes offrent également la possibilité de restituer le système contraint initial par des retours arrières et d'énumérer plusieurs solutions. L'énumération s'appuie sur des stratégies permettant de prendre en compte l'expérience et l'intuition des concepteurs sur la cohérence d'un choix par rapport au cahier des charges.

Les approches par contraintes ont commencé à être appliquées en conception dans les années 90. [Vargas, 1995] montre que les approches par contraintes peuvent modéliser avantageusement des contraintes produit et des contraintes processus en conception d'une culasse d'automobile. [Sam-Haroud, 1995] a utilisé les approches par contraintes pour un problème de conception préliminaire de pont. [Mulyanto, 2000] a utilisé la programmation par contraintes pour le traitement de l'incertitude et l'imprécision des connaissances en conception.

## **Bilan et positionnement**

Nous avons présenté l'intérêt de l'utilisation des techniques IA pour représenter les connaissances en conception. Nous avons présenté trois approches : à base de règles, à base de cas et à base de contraintes.

La modélisation des connaissances en conception avec les règles de la logique propositionnelle exige une grande quantité de variables et règles booléennes (et, ou, non), les modèles résultants sont alors complexes avec un faible niveau d'expressivité. L'utilisation des règles de la logique des prédicats offre un cadre plus avantageux pour formaliser les connaissances en conception, mais elles restent difficiles à manipuler par un non expert du domaine.

La réutilisation des cas dans le cadre des CBR pose le problème de complétude des connaissances. Le raisonnement à partir de cas est en fait un raisonnement qui n'a de chances de fonctionner que si le nombre de cas contenus dans la base est suffisant relativement à la dimension du problème courant. Dans la réalité, il est pratiquement impossible de réutiliser un cas "brut" de conception. En conclusion, le CBR seul ne répond pas à tous nos besoins d'aide à la conception.

L'utilisation des contraintes présente des concepts intéressants pour formaliser les connaissances en conception. La séparation explicite entre les connaissances produit et processus de conception, l'utilisation des concepts variables/domaines/contraintes naturels pour un non expert du domaine et la possibilité de représentation graphique de ces concepts font des approches par contraintes un cadre avantageux pour l'aide à la conception de produits, particulièrement dans un contexte de diversité importante.

### 2.2.3. Contraintes, conception et configuration

Le problème de conception est extrêmement général et complexe et il semble impossible d'imaginer un outil générique d'aide à la conception. Pour cette raison, la plupart des travaux traitant de la conception se sont intéressés à une ou plusieurs phases du processus de conception. Le problème de configuration peut être vu comme un sous-problème du problème de conception, où l'ensemble des composants possibles ainsi que leurs caractéristiques sont connus à l'avance. Le problème consiste à définir un produit, répondant à un cahier des charges, par la sélection et le paramétrage des différents composants.

Pour notre part, nous voyons le problème de configuration comme une variante de la conception routinière et en même temps comme la première phase du processus de conception. Nous développons dans la suite les caractéristiques d'un problème de configuration.

Dans ce qui suit, nous présentons les approches par satisfaction de contraintes (CSP). Dans un premier temps, nous définissons le cadre CSP, ses apports pour la conception, ses limites et quelques extensions. Ensuite, nous montrons comment ces approches peuvent être un cadre attractif pour représenter et résoudre chacune des phases de notre démarche de conception.

#### 2.2.3.1. CSP : propagation et satisfaction des contraintes

Un problème de satisfaction de contraintes (CSP) est défini par un ensemble de variables, chaque variable est associée à un domaine de valeurs, et d'un ensemble de contraintes qui mettent en relation les variables [Freuder, 1978] [Macworth, 1977] [Montanari, 1974].

[Montanari, 1974] a été le premier à définir un CSP formellement comme un triplet  $P = \langle V, D_V, C_V \rangle$  où :

- un ensemble de  $n$  variables  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  : une variable correspond à une propriété relative à certaines caractéristiques de différents objets qui apparaissent dans le problème réel,
- un ensemble  $D_V = \{d_{v_i} \mid v_i \in V\}$  de  $n$  domaines : un domaine est associé à une variable et représente l'ensemble des valeurs ou états que peut prendre cette variable,
- un ensemble  $C_V = \{C_S \mid S \subseteq V\}$  de contraintes : une contrainte est définie pour un ensemble de variables sur lesquelles elle porte et par un ensemble de combinaisons de valeurs qu'elle autorise. C'est une relation définie par un sous-ensemble du produit cartésien des domaines des variables contraintes.

A priori, les domaines des variables sont finis et discrets. Cela dit, nombre de définitions et algorithmes peuvent être étendus aux CSP à domaines continus. [Lhomme, 1993] parle alors de CSP numériques.

Un CSP peut être représenté sous la forme d'un hypergraphe de contraintes dont les nœuds constituent les variables et les hyper-arêtes (unaire, binaire,  $n$ -aires) représentent les contraintes. L'arité d'une contrainte est égale au nombre de variables sur laquelle elle porte. Un CSP, pour lequel toutes les contraintes ont une arité égale à un (contrainte unaire) et/ou deux (contrainte binaire), est appelé CSP Binaire. Notons, que tout problème de satisfaction de contraintes peut être transformé en CSP binaire [Montanari et Rossi, 1989] par des méthodes de binarisation de contraintes au prix de la multiplication du nombre de variables. Le pouvoir de représentation des contraintes binaires est cependant loin d'être négligeable, ces contraintes étant d'expression aisée et souvent naturelle [Regin *et al.*, 1998].

Une solution d'un CSP est une instanciation des variables respectant toutes les contraintes. Le problème est suivant le cas : de savoir s'il existe une solution, de trouver une solution, de trouver toutes les solutions ou de trouver les meilleures selon un critère. Ces problèmes sont NP-difficiles. Un grand nombre de problèmes réels sont modélisés et résolus à l'aide des CSP (configuration, conception, ordonnancement). Le problème le plus souvent considéré dans le cadre des CSP est le problème de satisfaction, consistant à chercher une et une seule valeur pour chacune des variables de façon que toutes les contraintes soient simultanément satisfaites. Un CSP est dit cohérent s'il admet au moins une solution, et incohérent dans le cas contraire.

La spécificité des techniques de propagation de contraintes est de transformer les graphes de contraintes en réduisant l'intervalle de définition des variables au fur et à mesure de la prise en compte des contraintes. La réduction du domaine d'une variable entraîne celle du domaine des variables voisines, ce qui justifie la notion de propagation cohérente "de proche en proche". Une technique de propagation sera d'autant plus pertinente que la réduction de domaines s'opérera tôt. Les CSP peuvent être résolus par l'utilisation de procédures de recherche aidées par des méthodes d'inférence de type arc-consistance [Jegou, 1991].

### 2.2.3.2. Intérêt et inconvénients d'application des CSP pour la conception

Dans le domaine de conception de produits, les concepteurs sont confrontés à des choix fonctionnels, structurels, technologiques et dimensionnels. Ces choix sont validés ou invalidés par des simulations de divers types. Les invalidations génèrent des itérations à une étape amont de la conception et une remise en question d'un choix antérieur. La propagation de contraintes des CSP et le concurrent engineering ont un objectif commun ; éviter de faire des tâches inutiles dans le futur en utilisant toute la connaissance disponible sur le produit tout en prévoyant les conséquences des différents raisonnements.

Les problèmes de conception peuvent présenter deux types de contraintes : celles opérant sur des variables à domaines finis et discrets et celles portant sur des variables continues. A notre connaissance, il n'existe pas de méthodes spécifiques pour propager des contraintes opérant sur ces deux types de variables. Le plus souvent, les contraintes fonctionnelles et techniques sont finies et discrètes, tandis que les contraintes géométriques ne le sont pas. Certains auteurs proposent de discrétiser les variables réelles pour utiliser les algorithmes d'arc cohérence. Cette technique, la plus utilisée, reste efficace et son inconvénient reste le comportement des variables entre les valeurs entières. D'autres auteurs utilisent l'algèbre des intervalles ou les méthodes de cohérence plus élevée [Lhomme, 1993]. Dans de nombreux cas, les contraintes liées au processus de conception portent sur des choix de composants ou de caractérisation des attributs, mais aussi des choix fonctionnels, structurels ou technologiques. Beaucoup de ces choix peuvent se mettre sous la forme de contraintes symboliques donc discrètes.

[Janssen, 1990] distingue en conception les contraintes de validation et les contraintes de préférence. Les contraintes de validation sont des contraintes qui doivent être toujours vérifiées. Les contraintes de préférence sont, quant à elles, plus "souples" et indiquent les préférences du concepteur.

Globalement, le cadre CSP offre un ensemble de caractéristiques pragmatiques intéressantes pour la représentation et la résolution des problèmes de conception :

- décisions cohérentes : à tout moment du processus de conception, le concepteur peut savoir a priori que ses choix sont cohérents avec les spécifications initiales,
- prise en compte du problème global,
- expression naturelle : l'expression des connaissances de conception est généralement plus concise qu'en utilisant le langage traditionnel de la logique propositionnelle,

- techniques éprouvées : de nombreux algorithmes ont été développés pour résoudre de nombreux problèmes de complexité variée.

L'utilisation des CSP en conception de produits présente quelques limitations. La première limitation concerne l'échec qui intervient à l'issue d'une propagation de contrainte : le domaine d'une variable devient vide. Lorsqu'un tel échec survient, le concepteur revient sur ses choix antérieurs pour en déduire la cause. Souvent, le concepteur se focalise sur son dernier choix, mais, dans des contextes particuliers, tous les choix antérieurs peuvent avoir une influence.

Le raisonnement du concepteur est perçu comme un ensemble de tâches. Une tâche de conception peut être considérée comme un processus qui se déclenche de manière conditionnelle et qui peut nécessiter de nouvelles variables et de nouvelles contraintes. Par exemple, l'existence d'une variable de conception, correspondant à un composant standard, peut être optionnelle. Dans ce type d'application, le problème de satisfaction de contraintes est de nature conditionnelle. Pour pallier aux limites des CSP classiques, les CSP conditionnels (communément appelés CSP dynamiques) ont été introduits par [Mittal et Falkenhainer, 1990].

### 2.2.3.3. Les CSP conditionnels (Cond CSP)

Les DCSP, pour Dynamic Constraint Satisfaction Problem, sont des extensions du formalisme des CSP classiques. Les variables du modèle peuvent être liées à des règles d'existence, appelées contraintes d'activation. Pour introduire ces contraintes, [Mittal et Falkenhainer, 1990] ont présenté le formalisme des CSP dynamiques. De manière identique à [Véron, 2001], nous les appelons CSP conditionnels afin de ne pas les confondre avec les CSP dynamiques présentés dans [Dechter, 1988] [Schiex et Verfaillie, 1993].

Dans l'approche classique, les ensembles  $V$ ,  $D$  et  $C$  sont fixés à l'avance. Chaque solution correspond à une affectation d'une et une seule valeur pour chaque variable. Pour les CSP conditionnels (CondCSP), l'affectation d'une valeur à toutes les variables n'est pas nécessaire. L'ensemble des variables nécessitant une affectation d'une valeur n'est pas spécifié dans la définition du problème. Nous distinguons alors les variables actives ; celles qui doivent apparaître dans la solution, des autres. Nous associons à une variable une valeur de son domaine de définition, si et seulement si cette variable est active.

La résolution d'un CondCSP consiste à définir les variables actives et leurs valeurs correspondantes. Un CondCSP est défini par un ensemble non vide  $V_I$  de variables initialement actives. Si le problème ne possède pas de variables additionnelles ( $V = V_I$ ), alors le CondCSP est équivalent à un CSP classique.

L'ensemble des contraintes dites de compatibilité d'un CSP « pur » est complété par un autre ensemble de contraintes d'activation permettant, à partir d'une ou de plusieurs variables initiales, d'activer ou non d'autres variables.

Un CSP conditionnel est défini par :

- un ensemble  $V$  définissant toutes les variables,
- un ensemble  $V_I$  (sous-ensemble de  $V$ ) non vide de variables initialement actives,
- un ensemble de domaines  $D_V$ , définissant les valeurs possibles de chaque variable,
- un ensemble  $C_C$  de contraintes de compatibilité actives lorsque les variables sur lesquelles elles portent sont actives,
- un ensemble  $C_A$  de contraintes d'activation.

La résolution d'un CSP conditionnel consiste à affecter une et une seule valeur à chaque variable active en respectant toutes les contraintes ( $C_C \cup C_A$ ).

Les contraintes d'activation sont réparties en trois ensembles :

- "Require Variable" : une variable est activée à partir d'une affectation de valeurs à un ensemble de variables déjà actives.
- "Require Not Variable" : une variable est non activée à partir d'une affectation de valeurs à un ensemble de variables déjà actives.
- "Always Require Variable" : une variable est activée à partir d'un ensemble de variables déjà actives (indépendamment de leurs valeurs).

Par rapport aux CSP, les CSP conditionnels présentent un apport majeur pour les problèmes de conception par leur possibilité de gérer l'existence des variables du modèle. Ceci permet de modéliser un problème de conception où certains choix sont optionnels, ce qui est pratiquement toujours le cas.

#### 2.2.3.4. La configuration de produits

Le problème de configuration peut être vu comme un sous-problème du problème de conception correspondant à la spécification de produits sur la base d'un modèle produit et des besoins client [Brown et Chandrasekaran, 1989]. Il est traité de manière routinière [Mittal et Frayman, 1989]. Beaucoup d'auteurs [Soininen *et al.*, 1998] [Friedrich et Stumptner, 1999] [Aldanondo *et al.*, 2000] définissent la configuration comme la recherche d'un ensemble de fonctions et d'un ensemble de composants satisfaisant les besoins du client et respectant le modèle du produit générique.

Dans le domaine de configuration de produits, la plupart des auteurs se réfèrent à la première définition proposée par [Mittal et Frayman, 1989] :

"Etant donné :

- un ensemble fixé de composants prédéfinis, où un composant est caractérisé par un ensemble de propriétés, un ensemble de ports qui définissent des connexions possibles entre composants, des contraintes liées à chaque port décrivant les composants pouvant être connectés sur ce port, et des contraintes structurelles,
- une description de la configuration souhaitée (besoin client),
- éventuellement des critères d'optimisation,

réaliser une ou plusieurs configurations satisfaisant toutes les spécifications et contraintes où une configuration est un ensemble de composants et une description des connexions entre composants."

Dans le cadre de sa thèse, [Véron, 2001] a dégagé une définition générale de la configuration : "Etant donné un modèle représentant le produit générique, la configuration consiste à capturer, de manière cohérente vis-à-vis du modèle, les souhaits de l'utilisateur pour aboutir à la définition d'un produit réalisable en termes de nomenclature arborescente et d'agencement des produits." Cette définition fait apparaître la possibilité de décrire un produit configurable en termes de composants (standard ou paramétrable) et/ou de fonctions, l'existence de variables et de domaines de définition pour capturer les caractéristiques de composants paramétrables, et l'existence de contraintes limitant les choix valides et les composants existant simultanément.

L'outil d'assistance, le configurateur (Figure 2.6), dans lequel est implanté le modèle du produit générique, permet d'instancier ce modèle générique rapidement et sans erreur.

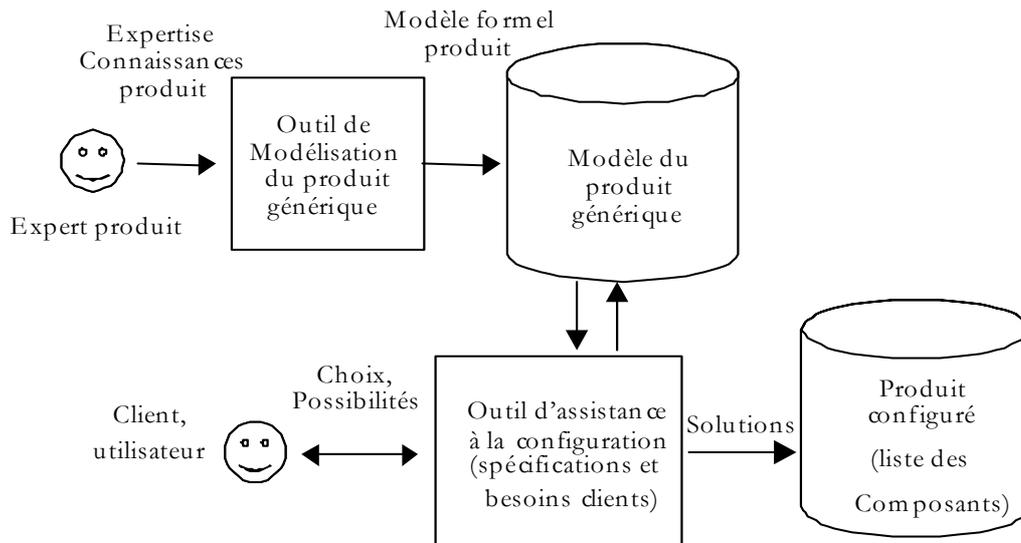


Figure 2.6 – Processus de configuration

Le modèle du produit générique doit être capable de représenter une famille de produits avec toutes les variantes et options possibles. Il regroupe toutes les connaissances nécessaires pour adapter le produit au besoin d'un client [Soininen, 1996]. La construction du modèle générique nécessite la capitalisation de toutes les connaissances relatives à un ensemble d'objets et à un ensemble de relations qui spécifient la manière de combiner ces objets pour former un ensemble de variantes du produit. La sélection de ces objets à partir d'un besoin spécifique, en cohérence avec ces relations, constitue la tâche de configuration.

Nous résumons, dans la Figure 2.7, les connaissances nécessaires pour construire un modèle du produit générique pour la configuration [Wieling et Schreiber, 1997].

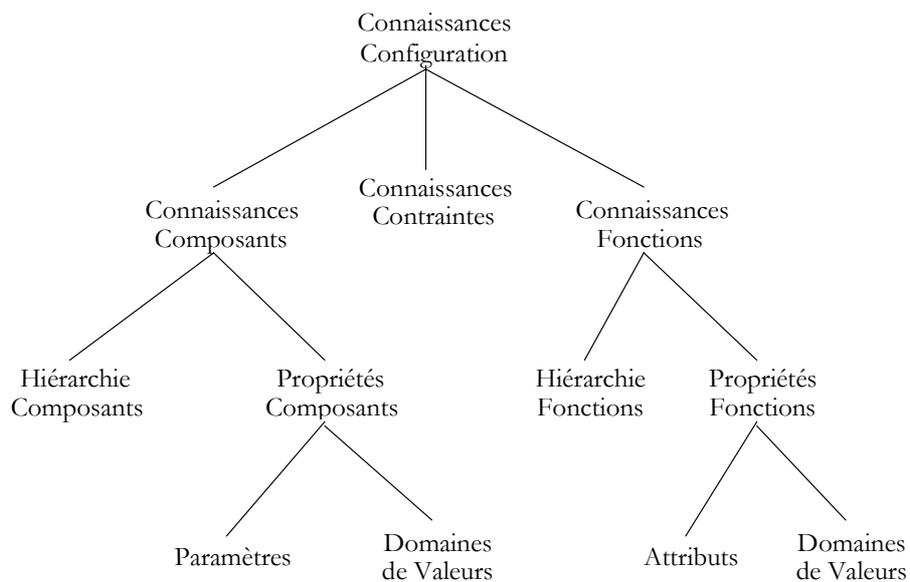


Figure 2.7 – Connaissances dans un modèle produit

Le produit est avant tout un assemblage de composants. Il est donc important d'identifier tous les composants (standard et paramétrables) susceptibles de former une variante de la famille. Les composants standard sont définis comme des composants ayant des propriétés à valeurs prédéfinies et figées. Les composants paramétrables sont caractérisés par des propriétés et des attributs à valeurs variables. Les valeurs possibles que peut avoir un attribut sont rassemblées dans un domaine de définition. L'ensemble des composants peut être représenté sous la forme d'une nomenclature générique. La configuration consiste à permettre la sélection de composants et à vérifier la compatibilité d'assemblage des composants. Le résultat de celle-ci est une nomenclature spécifique. La nomenclature spécifique seule ne suffit pas à définir le produit, en effet il peut y exister plusieurs agencements des composants [Brown, 1998b]. Dans ce cas, les possibilités d'agencement doivent apparaître dans le modèle générique. Il faut alors pouvoir représenter un agencement générique.

[Mittal et Frayman, 1989] définissent l'architecture fonctionnelle comme la décomposition d'un produit en fonctions. Dans ce cas, le modèle générique représente toutes les fonctions que peut fournir une famille de produits. La configuration consiste à sélectionner les fonctions et à évaluer leurs caractéristiques. À l'issue de cette configuration, la variante du produit est identifiée par un ensemble de fonctions avec des caractéristiques spécifiques au besoin. Ceci ne définissant pas physiquement une variante d'un produit, il est donc nécessaire de dériver, à partir des valeurs des caractéristiques des fonctions, la nomenclature et l'agencement des composants. Pour cela, il faut pouvoir exprimer des règles de correspondances entre les valeurs des fonctions spécifiées et des composants de la nomenclature générique.

Pour la construction du modèle du produit générique, il est nécessaire de définir les fonctions et les composants dans deux modèles interdépendants. Les fonctions d'un produit intéressent plus le client que sa structure physique. Modéliser le produit uniquement à travers sa structure technique ne répond au besoin de compréhension des fonctions du produit et ne favorise pas la relation client/fournisseur.

La modélisation avec une nomenclature générique de composants est appelée modèle explicite [Mannisto *et al.*, 1996]. Dans ce cas, le client doit avoir une connaissance experte du produit pour pouvoir exprimer son besoin sous la forme de composants. La modélisation avec une approche fonctionnelle est un modèle implicite. Le choix de composants, dans ce cas, reste la tâche du concepteur.

La Figure 2.8 présente la relation entre le modèle fonctionnel et la nomenclature générique [Véron, 2001].

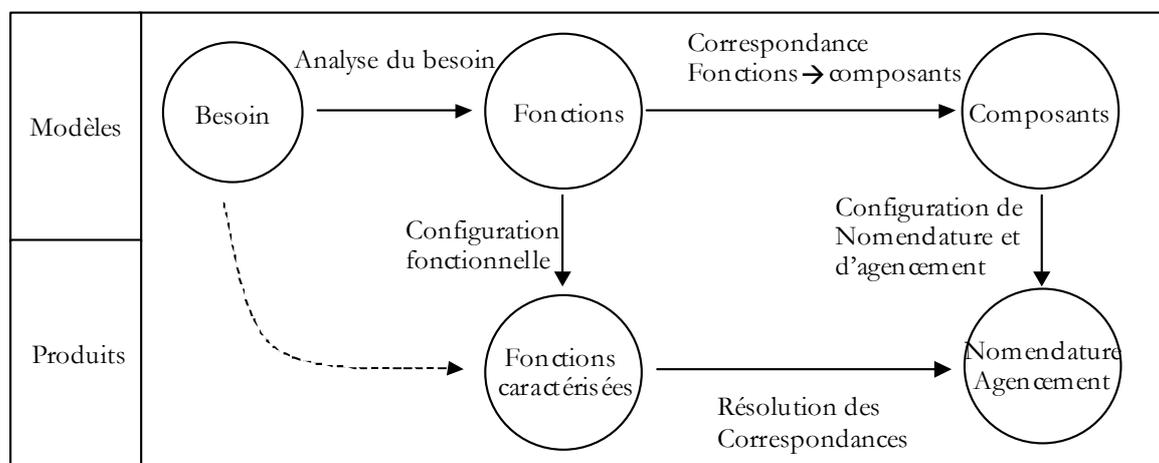


Figure 2.8 – Relation entre modèles fonctionnels et modèles de nomenclature [Véron, 2001]

Une analyse de la notion de personnalisation de produit a été développée par [Soininen, 1996]. En ce sens, la contribution de [Aldanondo *et al.*, 2002] vise à étudier comment la diversité des produits personnalisables et les besoins en modélisation de produit peuvent être traités avec des CSP et des CSP conditionnels. Les approches par contraintes forment un cadre simple manipulant deux concepts : les variables et les contraintes. L'expression de variables et de domaines de définition permet de représenter les composants, les fonctions et les attributs et valeurs des composants et fonctions.

Les approches de CSP ne traitent pas facilement des aspects structuraux des connaissances. Très peu de travaux ont été effectués dans cette direction. Les CSP composites ont été proposés par [Sabin et Freuder, 1996] et des extensions des CSP conditionnels traitant la structuration des connaissances en configuration ont été discutées et développées par [Véron et Aldanondo, 2000].

## **Bilan et positionnement**

La démarche de conception routinière, proposée au Chapitre 1, met en évidence une diversité importante du besoin. Cette diversité est caractérisée par une forte combinatoire dans les choix de fonctions, de sous-fonctions, de composants et de leurs caractéristiques. Pour satisfaire le besoin et les exigences du client, il est nécessaire de sélectionner ces fonctions et ces composants (phases 1 et 2 de notre démarche). Cette sélection s'apparentant fortement à de la configuration, nous proposons l'emploi des formalismes de CSP Conditionnels pour élaborer les modèles génériques utilisés dans l'assistance à ces deux phases.

## **2.3. Modèles et outils d'assistance à la démarche**

Les modèles produits et processus ainsi que les outils d'aide à la conception abordés auparavant (section 2.2) sont souvent orientés pour des produits issus de l'ingénierie mécanique. La particularité du système de distribution électrique pour l'automobile nous amène à proposer une approche originale. Dans cette partie, nous combinons ainsi des apports conceptuels et des éléments dépendant du système de distribution électrique.

### **2.3.1. Eléments génériques de modélisation produit et processus de conception**

Pour proposer des approches et des outils d'assistance au déroulement des phases du processus de conception, il est indispensable de regarder dans un premier temps comment structurer les différentes connaissances.

Dans le cadre de la thèse, nous nous intéressons aux modèles de connaissances qui représentent une classe de produits à concevoir.

Une classe de produits, ou famille de produits, est un ensemble de produits conçus et fabriqués au sein d'une même entreprise et dont la ou les fonctions principales sont identiques [Dufrière, 1991]. Nous ne nous intéressons donc plus à un seul produit mais à un ensemble de produits potentiels (variantes) que nous pouvons représenter avec un seul modèle.

La description d'une famille de produits est une description générique qui permet de spécifier toutes les variantes possibles du produit par l'expression de toutes les combinaisons possibles entre fonctions, attributs des fonctions, composants et paramètres des composants.

Pour notre application, une famille de câblages automobile correspond à tous les packs possibles d'un câblage allant du câblage haut de gamme au câblage bas de gamme.

La tâche de conception consiste à définir un ou plusieurs packs de la famille de câblages. Pour cela, il est indispensable de capitaliser et de structurer les connaissances relatives à la famille de câblages dans un modèle générique capable de représenter toutes les variantes et options possibles des différents packs de câblages (Figure 2.9). Une variante du câblage est identifiée par instantiation du modèle générique de manière à répondre à un ensemble de besoins spécifiques.

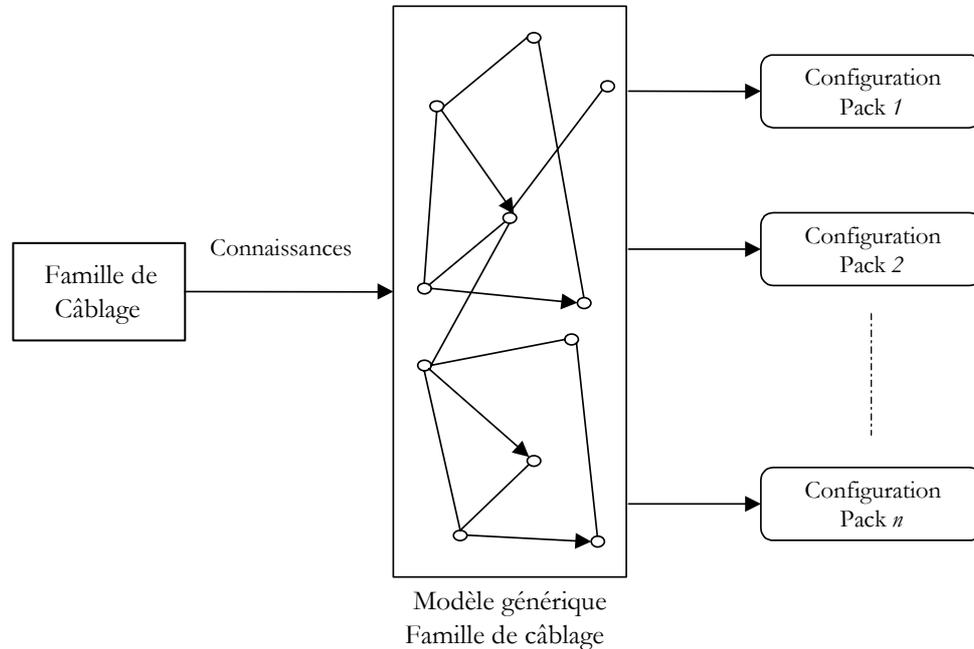


Figure 2.9 – Modèle générique de configuration des packs de câblage

La description d'une famille de produits s'articule généralement autour de trois points de vue : fonctionnel, physique et géométrique [Harani, 1997] [Sellini, 1999] [Tollenaere, 1992]. La description multi-vues d'une famille de produits permet de prendre en compte les différentes perceptions possibles qu'ont les acteurs d'un projet de conception (le client, le concepteur, le fabricant). La représentation des connaissances produit par ces trois points de vue doit fournir une définition complète d'une famille de produits.

La famille de câblages peut être représentée par différents modèles selon que l'on considère son aspect fonctionnel, physique ou géométrique :

- Le point de vue fonctionnel est nécessaire pour capter le besoin client et par conséquent interagir avec lui. Il décrit les différentes fonctions auxquelles la famille de produits doit répondre. Il est donné sous la forme d'une arborescence fonctionnelle composée de domaines fonctionnels, de fonctions et de sous-fonctions. Un domaine fonctionnel est un ensemble de fonctions de même type (le domaine éclairage comprend les fonctions feux codes, clignotant, lumière intérieure). Une fonction est spécifiée par un niveau de service (ensemble de caractéristiques et de propriétés) remplissant un besoin spécifique. Un niveau de service est identifié par une ou plusieurs solutions techniques qui correspondent aux moyens de réalisation de la fonction. La solution technique fournit un schéma logique d'une fonction.
- La vue physique est utilisée pour fournir des schémas de principe des sous-fonctions et des fonctions. La définition d'un schéma de principe consiste à remplacer le schéma logique de chaque fonction par un assemblage physique. Un assemblage physique est constitué d'un ensemble de composants standard et/ou paramétrables connectés pour fournir une fonction.

- Le point de vue géométrique est introduit pour construire des représentations géométriques des schémas de principe par la définition des agencements et des positionnements des composants. La représentation géométrique permet également de paramétrer certains composants et de générer une nomenclature de production pour chaque variante.

Les connaissances associées à chaque point de vue de la famille de produits peuvent être représentées sous la forme d'un modèle générique regroupant respectivement toutes les fonctions de la famille, toutes les solutions physiques associées à ces fonctions et toutes les représentations géométriques des solutions physiques (Figure 2.10). L'ensemble des contraintes qui s'appliquent sur les différents éléments de ces modèles et leurs interactions doivent être également exprimées.

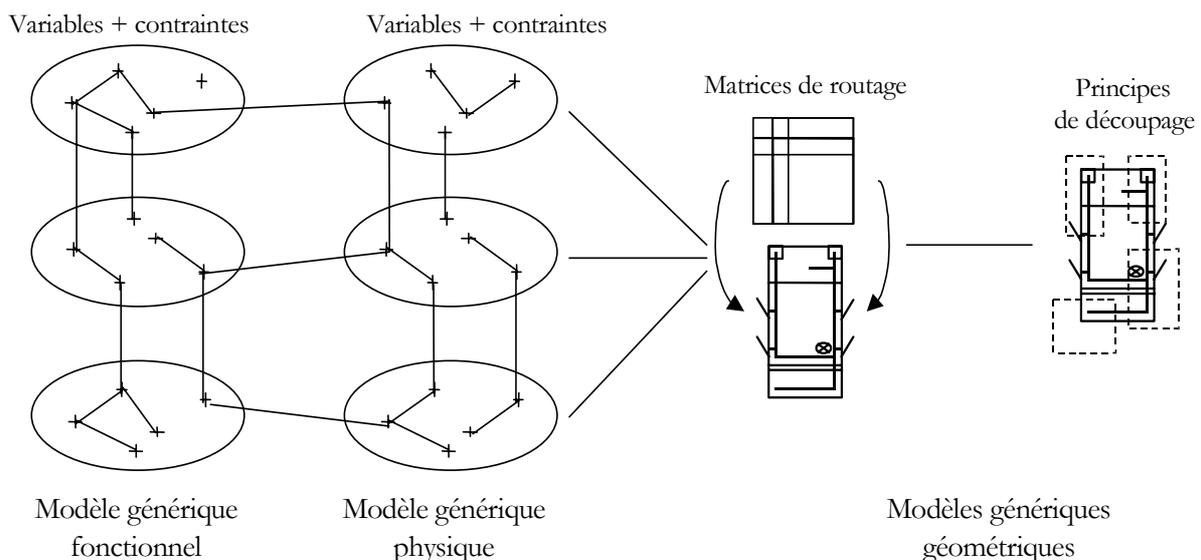


Figure 2.10 – Modèles génériques d'une famille de produits

Nous développons, dans la section suivante, les différentes approches de modélisation de chaque point de vue. Nous proposons de représenter les points de vue fonctionnel et physique par des approches par contraintes pour faciliter l'interaction avec le client, la représentation de la diversité et assurer la cohérence des choix. Le point de vue géométrique nécessite des visualisations des solutions. Pour cela, nous proposons des modèles génériques basés sur des représentations matricielles pour identifier les différentes connexions possibles entre les composants (agencement) ainsi que leurs coordonnées spatiales possibles (positionnement). Des principes de décomposition de produits complètent ce modèle afin de fournir des nomenclatures de production.

### 2.3.2. Etapes de la démarche et outils d'assistance à base de contraintes

La spécification des définitions fonctionnelle et technologique (phases 1 et 2 de la démarche proposée en 1.3.4) est caractérisée par une forte combinatoire dans les choix. Pour assister ces deux phases, nous proposons une approche par configuration basée sur des modèles génériques fonctionnel et physique.

Les modèles génériques fonctionnel et physique d'une famille de produits sont définis à l'aide du formalisme CSP conditionnels proposé par [Mittal et Falkenhainer, 1990] et illustrés dans [Soininen et Gelle, 1999] [Aldanondo *et al.*, 2002]. Les deux modèles sont interdépendants et sont reliés par d'autres contraintes, par d'autres variables et d'autres modèles génériques intermédiaires (Figure 2.11).

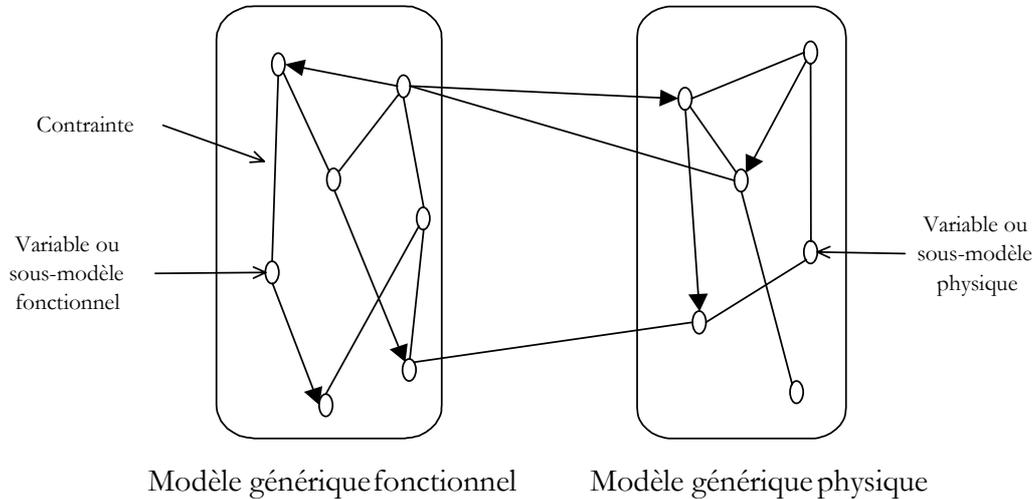


Figure 2.11 – Modèles génériques fonctionnel et physique d'une famille de produits

Dans ce qui suit, nous montrons comment se structurent les connaissances dans chaque modèle générique. Nous spécifions également des principes d'instanciation de ces différents modèles pour aboutir aux points de vue du produit au travers des phases de la démarche de conception.

### 2.3.2.1. Définition fonctionnelle

L'objectif de la première phase est de capturer et traiter les besoins fonctionnels des clients. Pour cela, nous avons représenté l'aspect fonctionnel du produit par une décomposition fonctionnelle. La racine de l'arbre constitue la famille de produits et les feuilles de l'arbre correspondent aux différentes fonctions que peut assurer la famille de produits. Le déroulement de cette première phase consiste à sélectionner les fonctions désirées par le client et à spécifier, pour chaque fonction validée, ses caractéristiques et ses propriétés.

### Modélisation

Dans le modèle générique fonctionnel, chaque fonction de la classe de produits correspond à un modèle CSP (Figure 2.12). Toutefois, les différents modèles sont reliés par un ensemble de variables et de contraintes formant ainsi le modèle générique fonctionnel que nous avons évoqué auparavant.

Dans le cas du modèle générique fonctionnel de la famille de câblages, nous avons autant de modèles génériques que de domaines fonctionnels et de fonctions électriques. Les variables du modèle fonctionnel correspondent aux fonctions et sous-fonctions, aux caractéristiques des fonctions et sous-fonctions, aux composants terminaux (capteurs et actionneurs) et à l'ergonomie et localisation des composants terminaux.

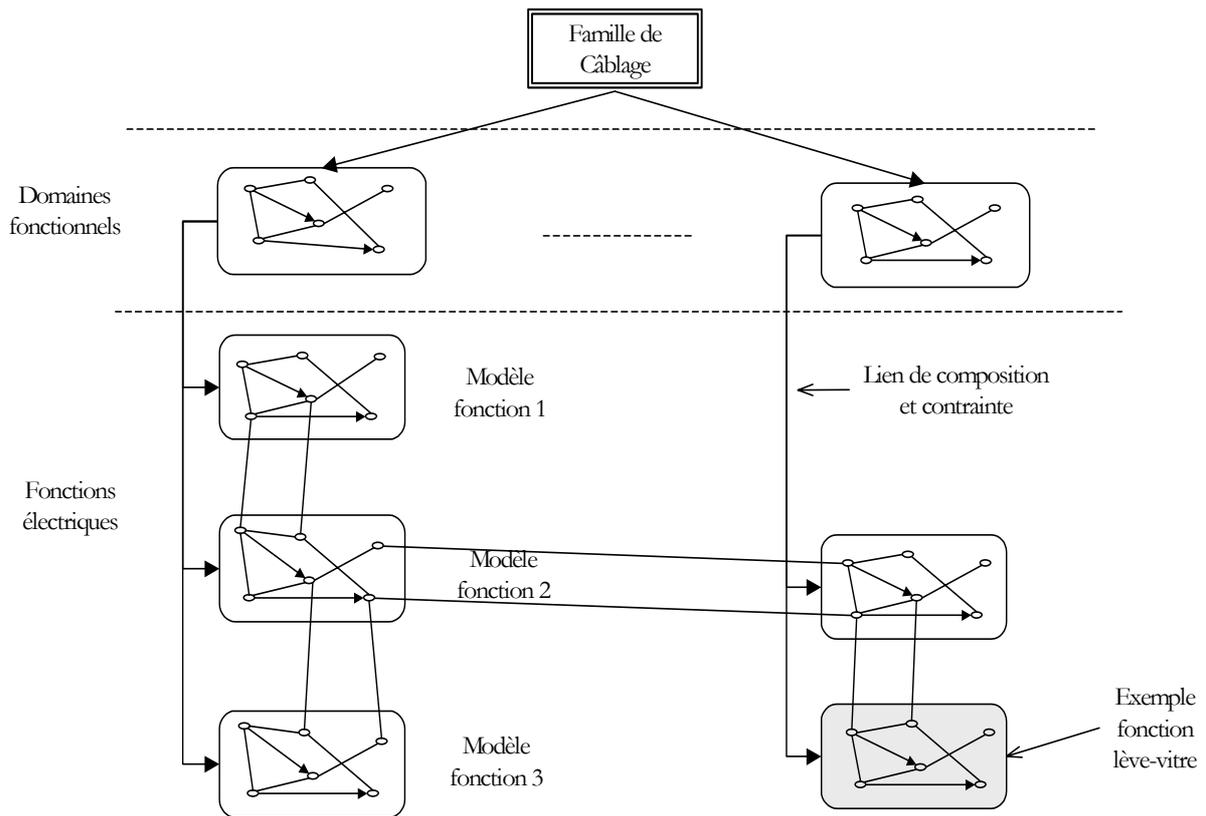


Figure 2.12 – Modèle générique fonctionnel d'une famille de produits (packs de câblage)

Pour caractériser une fonction de câblage, il s'agit de représenter :

- la fonction et le niveau de service rendu à l'utilisateur de la voiture,
- les types de composants externes au câblage à connecter (capteurs et actionneurs) dits composants de configuration,
- les zones ergonomiques choisies pour la localisation des composants externes.

Pour illustrer les éléments d'un modèle générique fonctionnel, nous détaillons dans la Figure 2.13 l'exemple de modélisation de la fonction lève-vitre (portes conducteur et passager) présentée en section 1.3.4.1.

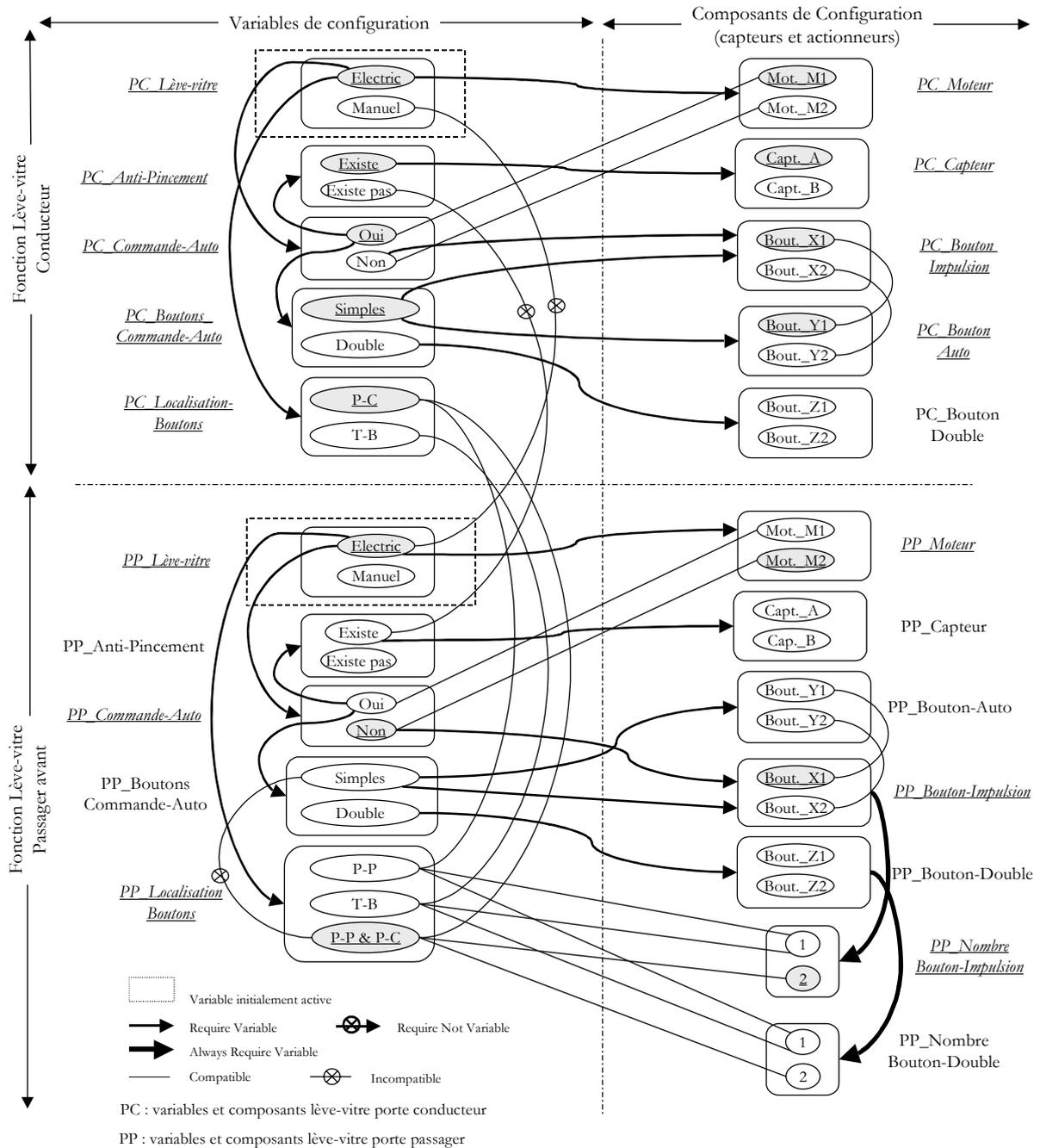


Figure 2.13 – Modèle générique fonctionnel de la fonction lève-vitre

La partie gauche du modèle décrit les caractéristiques de la fonction lève-vitre. Chaque caractéristique, représentée par une variable, est définie par un ensemble de valeurs possibles. Le choix de la valeur d'une variable est limité par des contraintes de compatibilité et des contraintes d'existence définies par les CSP conditionnels.

La partie droite du modèle décrit les possibilités de composants capteurs et actionneurs nécessaires pour définir un modèle générique de schémas logiques de la fonction lève-vitre.

La partie haute du modèle correspond à la sous-fonction lève-vitre conducteur et la partie basse à la sous-fonction lève-vitre passager avant. Une même modélisation peut être ajoutée pour les sous-fonctions lève-vitres arrières. Toutefois, ces dernières sous-fonctions n'existent pas dans le cas de famille de câblages d'un modèle de voiture à deux portes.

## Instanciation

L'instanciation des variables du modèle générique fonctionnel implique des choix de propriétés de fonctions (partie gauche de la Figure 2.13) ainsi que la sélection de composants capteurs et actionneurs (partie droite de la Figure 2.13).

Dans la Figure 2.13, les variables encadrées par un rectangle discontinu correspondent aux variables initialement actives ("PC\_Lève-vitre" et "PP\_Lève-vitre"). A ces variables, le concepteur doit obligatoirement affecter une et une seule valeur avant la fin du processus d'instanciation.

L'instanciation des autres variables est conditionnée par les contraintes de compatibilité et d'activation.

Par exemple, considérons les deux variables suivantes :

- "PC\_Lève-vitre" = { Electrique , Manuel } initialement active.
- "PC\_Moteur" = { Mot\_M1 , Mot\_M2 }.

Ces deux variables sont reliées par la contrainte d'activation suivante (Figure 2.14) :

Si [ "PC\_Lève-vitre" = "Electrique" ] Alors [ "PC\_Moteur" : active ]

Si [ "PC\_Lève-vitre" = "Manuel" ] Alors [  $\neg$  ("PC\_Moteur" : active) ]

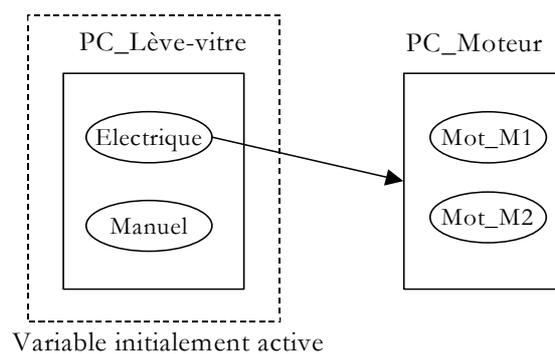


Figure 2.14 – Contrainte d'activation de variables

L'existence et l'instanciation de la variable "PC\_Moteur" sont contraintes par l'affectation de la valeur "Electrique" à la variable "PC\_Lève-vitre". Si c'est le cas, alors la variable "PC\_Moteur" est activée et, par conséquent, le concepteur lui affecte soit la valeur "Mot\_M1", soit "Mot\_M2". Dans le cas où le client sélectionne la valeur "Manuel" de la variable "PC\_Lève-vitre", la variable "PC\_Moteur" n'existe pas et n'est pas instanciée.

Une contrainte de compatibilité n'est activée que si toutes les variables (deux ou plus) reliées par cette contrainte sont déjà actives. Une contrainte de compatibilité modélise tous les n-uplets de valeurs admissibles entre deux ou plusieurs variables. A chaque étape d'instanciation, les valeurs incompatibles ne sont plus autorisées, selon les techniques de propagation.

Par exemple, considérons les deux variables suivantes :

- "PC\_Localisation-Boutons" = { Porte Conducteur (P-C), Tableau de Bord (T-B) }
- "PP\_Localisation-Boutons" = { Porte Passager (P-P), Tableau de Bord (T-B), Porte Conducteur et Porte Passager (P-C et P-P) }

Les couples admissibles sont représentés par la figure suivante (Figure 2.15) :

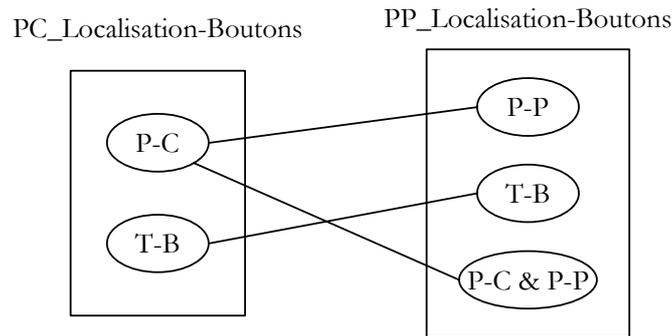


Figure 2.15 – Contrainte de compatibilité entre deux variables

Si les boutons lève-vitre conducteur sont déjà localisés sur le tableau de bord, la seule localisation autorisée pour les boutons lève-vitre passager est celle du tableau de bord, les deux autres possibilités ne sont plus autorisées.

Notons que dans notre exemple de modèle de la fonction lève-vitre, deux variables seulement sont initialement actives :

- "PC\_Lève-vitre" = { Electrique, Manuel } et
- "PP\_Lève-vitre" = { Electrique, Manuel }

Certaines variables du modèle seront activées, directement ou indirectement, à partir de ces deux variables, tandis que d'autres resteront inactives. Pour des raisons d'illustration, nous avons choisi de représenter ces deux variables initialement actives ("PC\_Lève-vitre" et "PP\_Lève-vitre") dans le modèle générique de la fonction lève-vitre. Une autre solution serait de faire apparaître ces deux variables dans un modèle de niveau supérieur, en l'occurrence celui du domaine fonctionnel Cockpit (Figure 2.16).

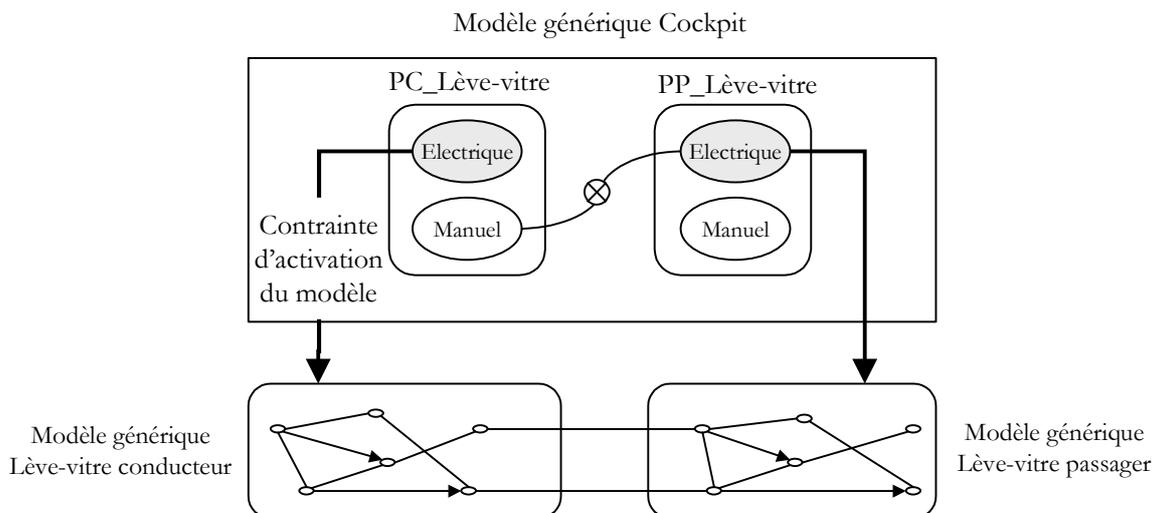


Figure 2.16 – Liens entre modèle de domaine fonctionnel et modèle fonctionnel

Pour illustrer un exemple d'instanciation, nous avons choisi d'affecter des valeurs aux variables du modèle générique "fonction lève-vitre" de la Figure 2.13 (variables et valeurs grisées et soulignées dans le modèle générique de la Figure 2.13), de manière à obtenir l'exemple du schéma logique de la fonction lève-vitre de la Figure 2.17 (présenté par la Figure 1.12 du Chapitre 1). Ce schéma logique est alors le résultat de la première phase de notre démarche de conception, définition fonctionnelle.

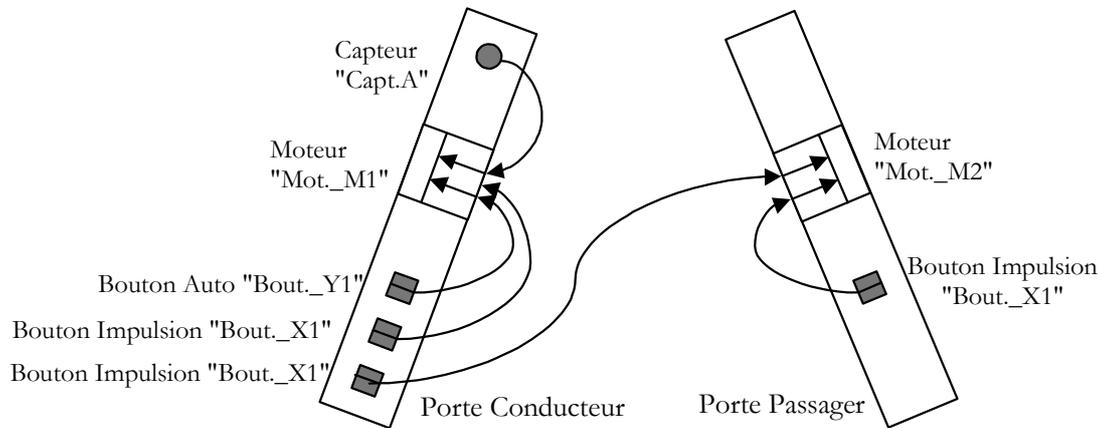


Figure 2.17 – Schéma logique validé de la fonction lève-vitre électrique pour un pack

Le Tableau 2.1 montre l'état des variables du modèle générique de la Figure 2.13 correspondant au schéma logique de la fonction lève-vitre de la Figure 2.17.

Variabiles	Variabiles initialement actives	Variabiles activées et instanciées	Valeur
<b>Fonction lève-vitre conducteur</b>			
PC_Lève-vitre	X	X	Electrique
PC_Anti-pincement		X	Existe
PC_Commande-Auto		X	Oui
PC_Boutons Commande-Auto		X	Simple
PC_Localisation Boutons		X	P-C
PC_Moteur		X	<i>Mot._M1</i>
PC_Capteur		X	<i>Capt._A</i>
PC_Bouton Impulsion		X	<i>Bout._X1</i>
PC_Bouton Auto		X	<i>Bout._Y1</i>
PC_Bouton Double			
<b>Fonction lève-vitre passager</b>			
PP_Lève-vitre	X	X	Electrique
PP_Anti-Pincement			
PP_Commande-Auto		X	Non
PP_Boutons Commande Auto			
PP_Localisation Boutons		X	P-C et P-P
PP_Moteur		X	<i>Mot._M2</i>
PP_Capteur			
PP_Bouton Impulsion		X	<i>Bout._X1</i>
PP_Bouton Auto			
PP_Bouton Double			
PP_Nombre Bouton Impulsion		X	2
PP_Nombre Bouton Double			

Tableau 2.1 – Etat des variables du modèle générique après instanciation

### 2.3.2.2. Définition technologique

Comme nous l'avons mentionné auparavant, le résultat de l'instanciation du modèle générique fonctionnel est une variante du schéma logique des fonctions du pack de câblage.

Durant la phase qui suit (définition technologique), des solutions technologiques sont associées à chaque schéma logique caractérisé dans la phase précédente. La recherche de ces solutions correspond à l'affectation de composants technologiques aux différentes fonctions, sous-fonctions et composants terminaux validés dans la phase fonctionnelle. Ceci est équivalent à un schéma de principe de la variante du produit.

#### Modélisation

L'ensemble des solutions technologiques possibles qui correspondent aux spécifications fonctionnelles est également caractérisé par une forte combinatoire des choix.

Pour cela, il est nécessaire de construire un modèle générique capable de définir tous les composants de la nomenclature générique. Pour ce faire, nous proposons, comme pour la première phase, une approche de configuration par contraintes en construisant un modèle physique générique.

Connaissant le schéma logique d'un pack, l'objectif de la phase de définition technologique d'un pack de câblage est de sélectionner un schéma de principe par fonction, soit :

- d'identifier les calculateurs et leur nombre (choix de principes de solution),
- de localiser tous les calculateurs,
- d'affecter tous les calculateurs aux fonctions identifiées et aux composants terminaux, et
- de respecter toutes les contraintes métiers.

Le choix de calculateurs et leur affectation aux différentes fonctions et composants sont caractérisés par une forte combinatoire. Pour assister cette tâche, nous proposons un modèle de configuration générique des schémas de principe capable de représenter toutes les possibilités de choix de calculateurs et toutes les possibilités de leur affectation aux fonctions et composants.

Les variables du modèle correspondent :

- aux différents composants calculateurs : existence ou non de chaque calculateur, le nombre de chaque calculateur,
- aux différentes affectations calculateurs/fonctions : une fonction peut être soit indépendante des calculateurs, soit gérée par un ou plusieurs calculateurs,
- aux différentes affectations calculateurs/composants terminaux (capteur et actionneur) : un composant peut être soit indépendant des calculateurs, soit relié à un ou plusieurs calculateurs,

Les contraintes du modèle peuvent être :

- des contraintes métier (du concepteur) : par exemple une fonction électrique peut avoir son propre calculateur dédié, un seul calculateur est affecté à un domaine fonctionnel, tout le câblage est géré par un seul calculateur central, le nombre et le niveau de satisfaction des fonctions imposent un certain nombre de calculateurs,
- des contraintes de type héritage : par exemple si le concepteur ou le client choisit d'affecter un calculateur à une fonction, alors tous les composants capteurs et actionneurs du schéma logique de cette fonction sont automatiquement reliés à ce calculateur,

Pour illustrer nos propos, nous présentons dans la Figure 2.18 un modèle générique de sélection de calculateurs et de leur affectation à la fonction lève-vitre. Cette figure est commentée en détail dans la section suivante.

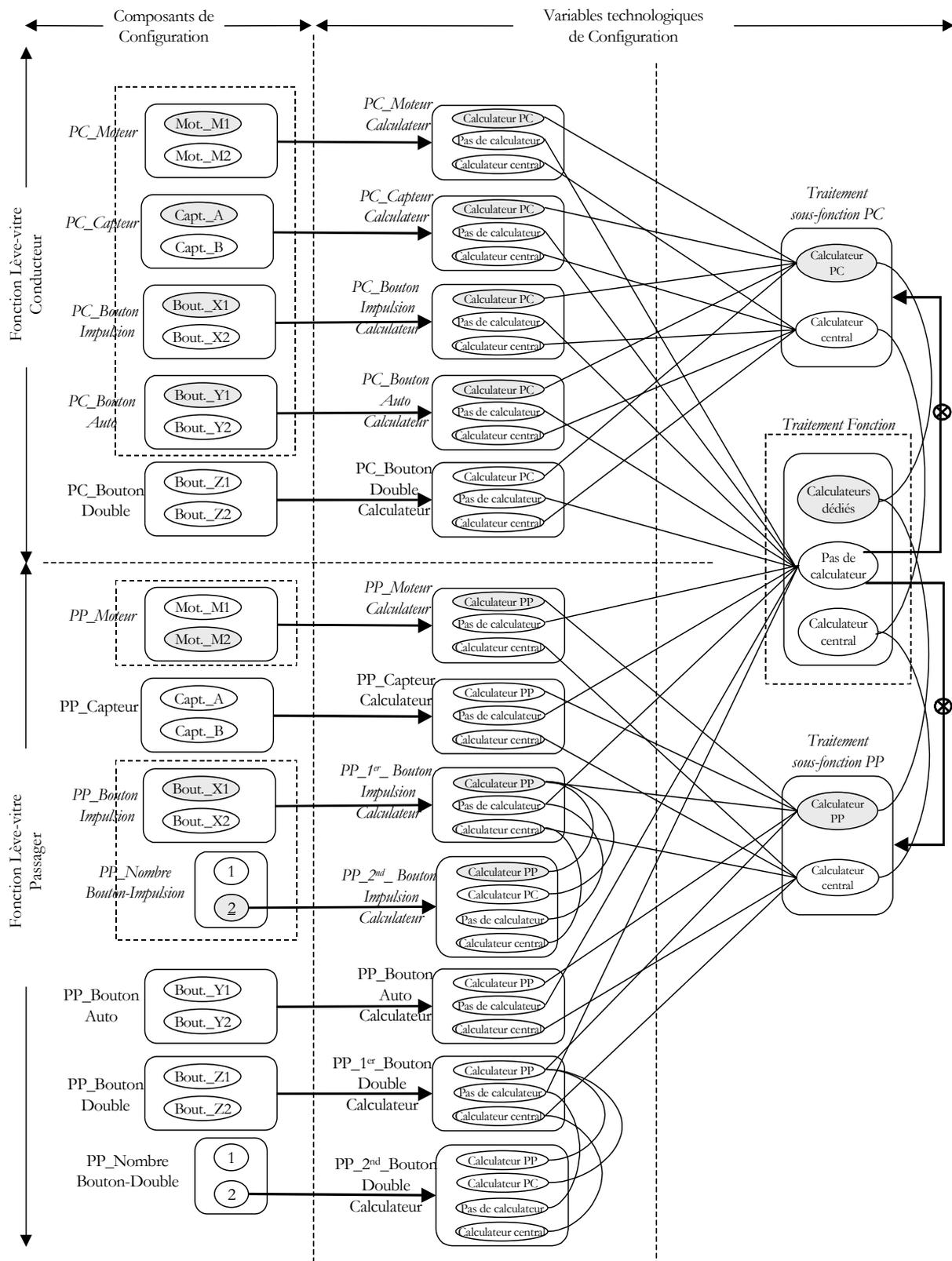


Figure 2.18 – Modèle générique physique de la fonction lève-vitre

Dans certains cas, il est possible d'ajouter une autre phase de configuration qui permet de passer du schéma de principe (solution technologique) à la nomenclature du pack. Pour ce faire, il est nécessaire de construire un modèle de nomenclature générique permettant de représenter toutes les combinaisons de composants d'une famille de packs. Ce modèle générique doit regrouper les composants fils électriques, les connecteurs, les fusibles et les relais. Dans notre cas, il est très difficile de construire un modèle de nomenclature générique pour représenter toutes les possibilités de choix de fils et par conséquent de connecteurs. En effet, le paramétrage des fils nécessite des éléments et des traitements géométriques. Par contre, le modèle générique des solutions technologiques (choix de calculateurs) que nous proposons regroupe une représentation générique des extrémités possibles des fils. Les extrémités, identifiées par des composants terminaux, définissent les points de départ et les points d'arrivée possibles pour chaque lien logique, donc pour chaque fil.

## Instanciation

Pour le traitement de la fonction lève-vitre, trois solutions technologiques sont possibles (partie droite de la Figure 2.18), que nous représentons par la Figure 2.19.

Elles correspondent aux valeurs de la variable initialement active "Traitement Fonction" :

- "Pas de calculateur" : cette valeur exprime le fait que la fonction lève-vitre n'est pas gérée par un calculateur.
- "Calculateur central" : les deux sous-fonctions lève-vitre conducteur et lève-vitre passager sont traitées par un seul calculateur central localisé sous le tableau de bord. Ce calculateur peut être dédié également à d'autres fonctions, par exemple la fonction réglage des rétroviseurs extérieurs.
- "Calculateurs dédiés" : dans ce cas, chacune des deux sous-fonctions (lève-vitre conducteur et lève-vitre passager) est reliée à un calculateur spécifique.

La contrainte d'activation qui relie la variable "Traitement Fonction" aux deux variables "Traitement sous-fonction PC" et "Traitement sous-fonction PP" signifie que ces deux variables n'existent pas dans le cas d'affectation de la valeur "Pas de calculateur" à la variable "Traitement Fonction". Elles le sont uniquement dans le cas d'affectation de l'une des deux autres valeurs.

La valeur "Calculateur central" (resp. "Calculateurs dédiés") de la variable "Traitement Fonction" est compatible à la fois avec la valeur "Calculateur central" (resp. "Calculateur PC") de la variable "Traitement sous-fonction PC" et avec la valeur "Calculateur central" (resp. "Calculateur PP") de la variable "Traitement sous-fonction PP" (Figure 2.19).

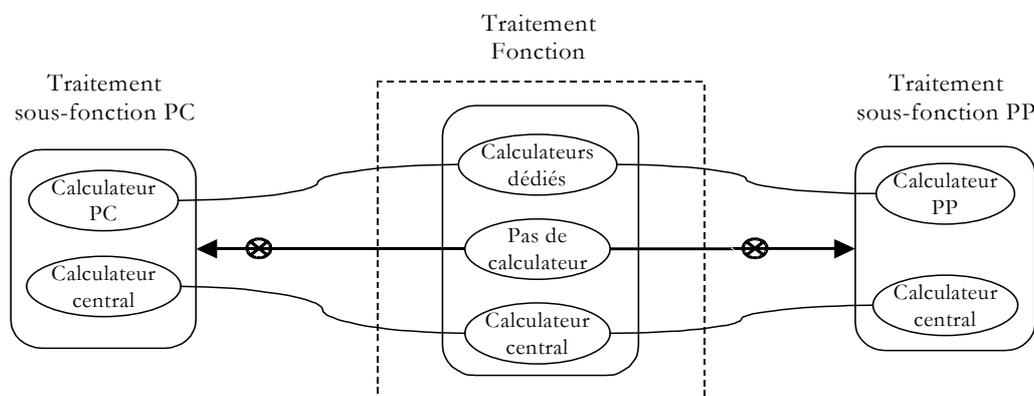


Figure 2.19 – Choix de calculateurs pour la fonction lève-vitre

Les variables de la partie gauche du modèle générique physique (Figure 2.18) correspondent aux groupes de composants terminaux (capteurs et activateurs) identifiés dans le modèle générique fonctionnel (Figure 2.13). Chacune de ces variables est reliée à une variable technologique spécifiant les possibilités d'affectation des calculateurs aux composants capteurs et activateurs. Ces variables technologiques d'affectation sont illustrées dans la partie centrale de la Figure 2.18 :

- Pour les composants capteurs/activateurs de la sous-fonction lève-vitre conducteur (partie haute et centrale de la Figure 2.18), les variables d'affectation ont comme valeurs possibles : "Calculateur PC", "Pas de calculateur", "Calculateur central".
- Pour les composants capteurs/activateurs de la sous-fonction lève-vitre passager (partie basse et centrale de la Figure 2.18), les variables ont comme valeurs possibles : "Calculateur PP", "Pas de calculateur", "Calculateur central".

Notons qu'il est possible d'activer la fonction lève-vitre passager par un second bouton situé sur la porte conducteur ("PP\_Nombre Bouton-Impulsion" = 2 ou "PP\_Nombre Bouton-Double" = 2), ce second bouton peut être relié au calculateur situé sur la porte conducteur (le plus proche). Les deux variables technologiques ("PP\_2<sup>nd</sup>\_Bouton\_Impulsion\_Calculateur" et "PP\_2<sup>nd</sup>\_Bouton\_Double\_Calculateur") ont en conséquence quatre valeurs possibles :

{"Calculateur PP", "Calculateur PC", "Pas de calculateur", "Calculateur central" }.

Les contraintes de compatibilité montrent les affectations possibles des calculateurs aux différents composants capteurs et actionneurs. Notons que beaucoup de ces contraintes ne sont pas difficiles à gérer. En effet, elles correspondent à un simple mécanisme d'héritage. L'affectation d'un calculateur à une fonction donnée implique automatiquement la connexion de ce calculateur à tous les composants capteurs et actionneurs définissant le schéma logique de la fonction, par exemple :

- Si le concepteur choisit de configurer la fonction lève-vitre sans traitement par calculateur ("Traitement Fonction" = "Pas de calculateur"), alors tous les composants capteurs/activateurs correspondant à cette fonction ne seront pas reliés à un calculateur. Les variables technologiques (actives) héritent de la valeur "Pas de calculateur" de la variable "Traitement Fonction".
- Si le concepteur décide de gérer la fonction lève-vitre conducteur par un calculateur dédié ("Traitement sous-fonctions PC" = "Calculateur PC", alors tous les composants capteurs/activateurs de cette sous-fonction (configurés durant la phase fonctionnelle) doivent être reliés au Calculateur PC. Les variables technologiques (actives) héritent de la valeur "Calculateur PC" de la variable "Traitement sous-fonction PC". Le même processus d'héritage est appliqué aux variables technologiques de la sous-fonction lève-vitre passager.

Toutefois, pour des raisons de localisations ergonomiques, certains composants de la sous-fonction lève-vitre passager peuvent être reliés à un calculateur autre que le calculateur "Calculateur PP" situé dans la porte passager. En effet, dans le cas de traitement de la sous-fonction lève-vitre passager par un calculateur situé sur la porte passager et de la possibilité de son activation par un autre bouton situé sur la porte conducteur, ce second bouton peut être relié au calculateur situé sur la porte conducteur. D'où la contrainte de compatibilité entre la variable "PP\_2<sup>nd</sup>\_Bouton\_Impulsion\_Calculateur" et la variable "PP\_2<sup>nd</sup>\_Bouton\_Double\_Calculateur". Le Tableau 2.2 et la Figure 2.20 présentent cette contrainte.

Variable 1 : "PP_1 <sup>er</sup> _Bouton_Impulsion_Calculateur"	Variable 2 : "PP_2 <sup>nd</sup> _Bouton_Impulsion_Calculateur"
Calculateur PP	Calculateur PP
Calculateur PP	Calculateur PC
Pas de calculateur	Pas de calculateur
Calculateur Central	Calculateur Central

Tableau 2.2 – Contrainte de compatibilité entre deux variables technologiques

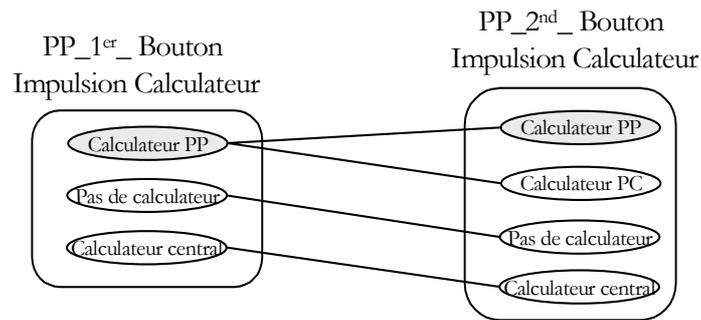


Figure 2.20 – Contrainte de compatibilité entre deux variables technologiques

Le problème de la configuration physique permet, étant donné le modèle générique, de trouver une instanciation à toutes les variables actives en respectant toutes les contraintes. L'instanciation de ce modèle prend en compte les résultats de l'instanciation du modèle fonctionnel.

Pour illustrer un exemple d'instanciation, nous avons choisi d'affecter des valeurs aux variables activées du modèle physique (Figure 2.18 en grisé) de manière à obtenir le schéma de principe de la fonction lève-vitre de la Figure 2.21 (présenté également par la Figure 1.13 du Chapitre 1). Cette solution consiste à traiter chaque sous-fonction par un calculateur dédié (Calculateur PC et Calculateur PP).

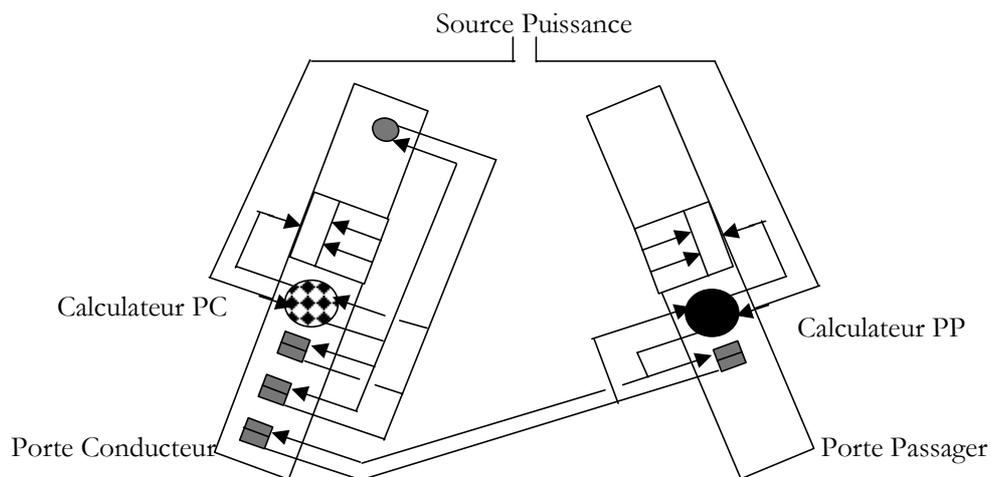


Figure 2.21 – Schéma de principe de la fonction lève-vitre avec les calculateurs associés

### 2.3.2.3. Définition géométrique et définition de modules

Le résultat des deux phases de configuration fonctionnelle et technologique est un ensemble de composants (une nomenclature spécifique du produit) sans information sur leur positionnement. La nomenclature spécifique seule ne suffit pas pour définir le produit, en effet il peut y exister plusieurs positionnements et agencements des composants. Par conséquent, les possibilités de positionnement et d'agencement doivent être représentées dans un modèle générique. Il faut alors pouvoir représenter dans ce modèle générique un positionnement et un agencement génériques. Pour répondre à ce besoin, deux possibilités existent : le positionnement absolu des composants par rapport à un repère et le positionnement des composants les uns par rapport aux autres.

En configuration de produit, la problématique de positionnement relatif de composants (agencement) a été traitée avec les notions de "Ports" et de "Connecteurs" [Mittal et Frayman, 1989]. [Friedrich et Stumptner, 1999] ont utilisé les ports pour traiter le problème d'agencement de composants deux à deux (cartes électroniques). Toutefois, l'application de ce type d'approche, se révèle particulièrement difficile pour d'autres situations [Aldanondo *et al.*, 2003] : la menuiserie, les machines outils, et particulièrement le câblage.

Le positionnement absolu d'un composant peut être exprimé par un ensemble d'attributs de position représentant les différents axes d'un repère de positionnement. Pour un problème de configuration de meubles (menuiserie industrielle), [Aldanondo *et al.*, 2001] préconisent une approche par contrainte. Pour définir le schéma d'un meuble, ils associent à chaque composant une ou plusieurs variables descriptives et/ou continues supplémentaires décrivant ses positions absolues possibles. Des contraintes d'agencement relient les attributs de position. Toutefois, cette approche de modèle générique d'agencement reste difficile à construire dans les cas de produits complexes et de produits ayant beaucoup de composants et de connections.

Dans notre cas, d'une part le câblage automobile est un produit très complexe et il est constitué de beaucoup de composants paramétrables (environ 500 fils électriques) et d'autre part, les composants fils ne sont pas dimensionnés. Il est clair qu'il est difficile de construire un modèle générique capable de représenter tous les positionnements possibles de tous les fils d'un câblage. Il est alors nécessaire de recourir à d'autres types d'outils d'assistance.

### 2.3.2.4. Conclusions et discussions

Les modèles génériques fonctionnel et physique sont reliés par les variables composants externes (capteurs et actionneurs). Ces variables correspondent à la fois à la partie droite du modèle générique fonctionnel (Figure 2.13) et à la partie gauche du modèle générique physique (Figure 2.18). Ceci assure la cohérence des deux modèles et permet, pendant la phase de définition technologique, de récupérer les résultats de la première phase de définition fonctionnelle (les composants capteurs et actionneurs sélectionnés). La Figure 2.22 illustre la relation entre les deux modèles génériques.

L'ensemble des variables et des contraintes définissent le modèle produit. Les contraintes d'activation, quant à elles, imposent de plus des antériorités dans l'instanciation des variables induisant ainsi une forme de représentation du déroulement du processus de conception. Le modèle générique obtenu représente donc à la fois un modèle produit et un modèle processus.

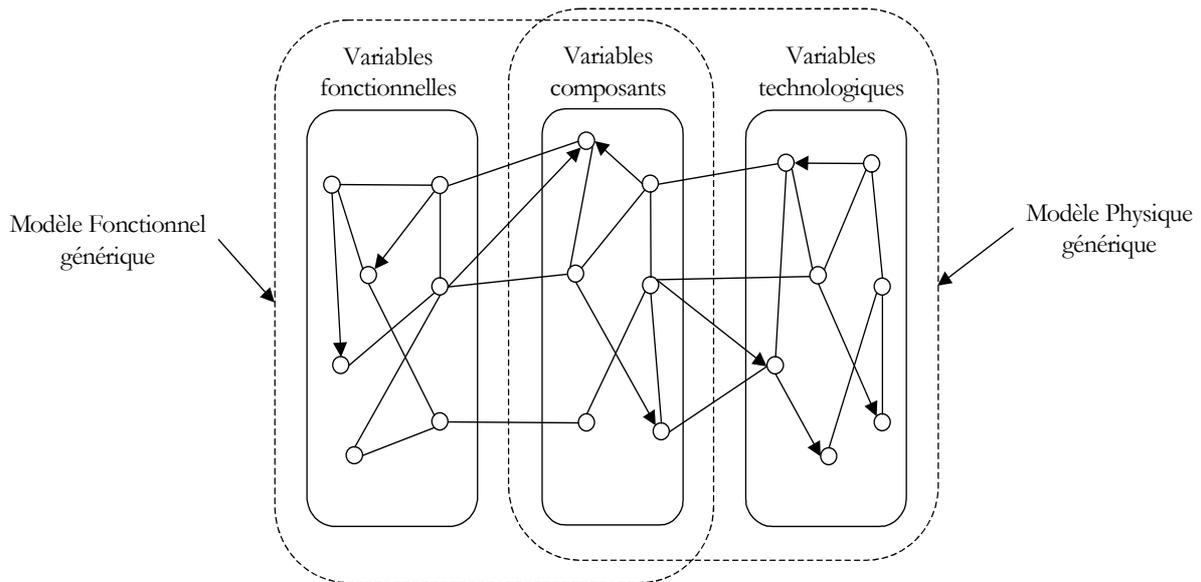


Figure 2.22 – Relation entre modèles fonctionnel et physique

La complexité et la multiplication du nombre de fonctionnalités et de solutions technologiques offertes aux clients, particulièrement pour le câblage automobile (environ mille fonctions électriques), nécessitent d'assister les phases de définitions fonctionnelle et physique par des approches et des outils capables de gérer avec cohérence et rapidement la combinatoire des choix de fonctions, de leurs niveaux de service et de composants. La configuration à base de contraintes s'avère un outil rapide et puissant pour passer d'un besoin pouvant présenter une forte diversité à des spécifications fonctionnelles et technologiques avec la garantie d'un fonctionnement satisfaisant et cohérent (satisfaction des contraintes).

En conclusion, les approches de configuration par contraintes aident le concepteur à instancier les modèles génériques fonctionnel et physique, rapidement et sans erreur. Mais cette approche reste limitée pour traiter les problèmes mettant en œuvre des contraintes géométriques et d'agencement, particulièrement pour le cas du câblage automobile. Nous pensons que les outils de type modelleur CAO se prêtent mieux aux représentations géométriques. Toutefois, il est indispensable de les assister avec d'autres formes de modèles génériques capables d'exploiter les résultats des phases de définitions fonctionnelle et technologique.

### 2.3.3. Proposition d'outils d'assistance à base de modèles génériques exploités par les modelleurs CAO

Initialement, les soucis des concepteurs étaient de modéliser géométriquement le produit à des fins de représentation virtuelle. Des environnements CAO sont alors développés pour la modélisation géométrique, souvent pour des applications spécifiques. Ils n'offrent aucune possibilité de représenter les connaissances relatives au produit et à son processus de conception.

Le contexte de conception intégrée a contraint les concepteurs à faire évoluer les outils CAO pour pouvoir prendre en compte des informations non géométriques. Pour cela, des modules supplémentaires à base de modèles génériques sont intégrés dans les modelleurs géométriques : modules à base de langages objets, à base de règles, à base de contraintes et à base de cas. Une synthèse des principaux modelleurs CAO et de leurs caractéristiques est donnée par [Vargas, 1995].

Pour fournir des représentations géométriques cohérentes avec les points de vue fonctionnel et physique, il est avantageux de doter les modeleurs CAO de bases de connaissances contenant des bibliothèques d'objets et des modèles formels.

### 2.3.3.1. Définition géométrique

Dans la démarche de conception que nous avons proposée, la troisième étape traite du problème d'agencement de composants et de la prise en compte des contraintes géométriques. Elle consiste à identifier les localisations exactes des capteurs et actionneurs et à router ensuite les fils. Pour cette phase, les modeleurs CAO peuvent exploiter des bases de données contenant des bibliothèques de composants et peuvent également exploiter des modèles formels qui représentent toutes les possibilités de positionnement et d'agencement de composants.

Dans le cas du câblage automobile, les modèles formels sont généralement fournis par le constructeur automobile sous forme de schémas papier ou de fichiers électroniques. Pour la définition des branches de fils (un ensemble de fils regroupés et enrobés), le concepteur peut exploiter des matrices de routage qui définissent des espaces possibles de cheminement des composants fils sous différentes contraintes (longueur des fils, diamètre des branches). Cette matrice est une forme de modèle générique. Elle regroupe tous les composants (capteurs, actionneurs et calculateurs) pouvant définir toutes les fonctions du câblage.

### Modélisation

Pour illustrer un modèle générique, nous présentons l'exemple d'une matrice de routage des fils de la fonction lève-vitre (Figure 2.23). Cette matrice définit une bibliothèque de composants et les différentes possibilités de connexion entre ces composants schématisées dans la Figure 2.24.

La première ligne et la première colonne de la matrice de routage représentent les composants (capteurs, actionneurs et calculateurs) pouvant définir la fonction lève-vitre ainsi que leurs localisations possibles (points terminaux des fils) : points "0" à "19". D'autres points, de routage, sont introduits dans la matrice pour définir les points de cheminement des fils : points "21" à "36". Ce sont des nœuds intermédiaires.

Un élément "X" de la matrice de routage, identifié par l'intersection d'une ligne et d'une colonne, indique une possibilité d'existence d'un fil ou d'un chemin rectiligne entre deux composants, un composant et un point de routage ou deux points de routage.



## Instanciation

La définition du schéma géométrique d'une fonction ou d'un pack revient à trouver un chemin pour chaque fil électrique. Le résultat de la définition technologique est un schéma de principe qui fait apparaître les composants externes au câblage ainsi que les connexions entre les composants.

Les points de routage du schéma de principe de la fonction lève-vitre sont ensuite identifiés sur la matrice de routage. Ces points correspondent aux éléments "X" de la matrice en gras et encadrés. Les éléments "X" restants ne sont pas activés soit parce que les deux composants terminaux à connecter ne figurent pas dans le schéma de principe, soit parce que les deux points de routage ne sont pas sélectionnés. La Figure 2.24 présente le schéma géométrique de la fonction lève-vitre (résultat de notre démarche) avec la spécification des branches et points de routage.

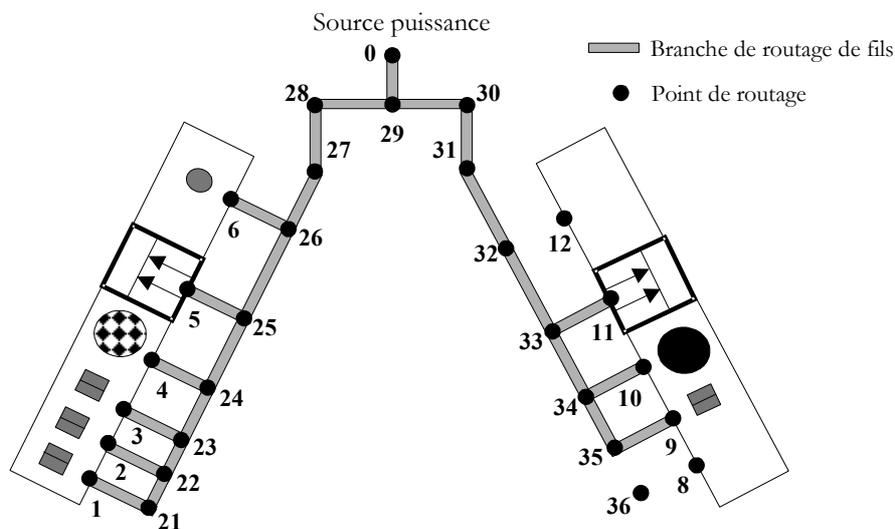


Figure 2.24 – Points de routage des fils de la fonction lève-vitre

Un modelleur CAO peut alors représenter ces points de routage ainsi que les fils. Après le routage, les longueurs des segments de fils peuvent être calculées. [Cerezuela *et al.*, 1995] [Cerezuela, 1996] proposent une approche multicritère par analogie à l'ordonnancement pour le cheminement des fils d'un câblage d'hélicoptère.

### 2.3.3.2. Définition de modules

Les outils de CAO traditionnelle offrent également la possibilité de décomposer le pack en plusieurs modules. Ils exploitent des connaissances déjà acquises sur des principes et des schémas de décomposition. Des procédures de découpe sont donc appliquées aux schémas géométriques des packs pour générer des schémas géométriques pour chaque module. Cette tâche génère une diversité en références de modules supportées par les processus de production et logistique. Cette diversité interne n'est pas vue par les clients utilisateurs et constructeurs. Dans nos travaux, nous n'abordons pas les outils d'assistance à la décomposition (principes de découpe). Pour la suite, nous supposons connues les possibilités de décomposition de chaque pack identifié en modules.

La Figure 2.25 montre un exemple de découpage physique du pack fonction lève-vitre en deux modules : module porte conducteur et module porte passager.

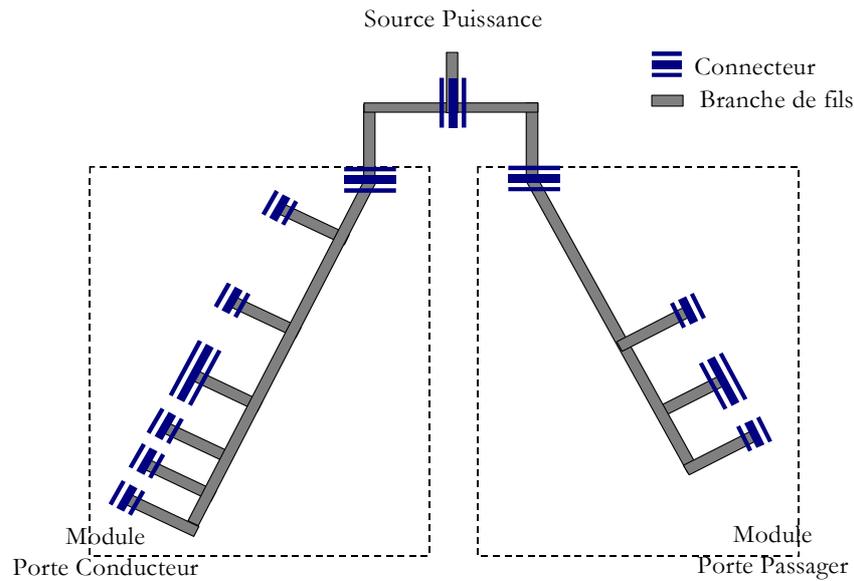


Figure 2.25 – Définition des modules de pack

## 2.4. Conclusions

Dans ce second chapitre, nous avons proposé des approches et des outils pour assister les différentes phases de notre démarche de conception de produits à forte diversité.

Dans la première partie, nous avons dressé un état de l'art sur l'ingénierie des connaissances en conception. Pour cela, un panorama des modèles produit et processus de conception a été exposé ainsi que les différentes techniques issues de l'Intelligence Artificielle de modélisation des connaissances.

La forte diversité qui caractérise à la fois le besoin client et les solutions techniques que propose le concepteur a justifié notre choix des approches par contraintes pour modéliser les différentes connaissances produit et processus de conception.

Suite à ce choix, nous avons montré les apports des approches par propagation de contraintes (CSP et CSP conditionnels) pour la formalisation des problèmes de conception, notamment la configuration.

Nous avons ensuite proposé d'assister les phases de notre démarche de conception par des modèles génériques à base de contraintes. Les limites d'application des approches CSP pour les problèmes mettant en œuvre des éléments géométriques nous ont amené à traiter les phases de définitions géométriques à l'aide de modelleur CAO.

Nous avons montré alors comment les approches par contraintes et les modelleurs CAO peuvent se compléter pour assister la conception d'un pack de produit, le câblage automobile dans notre cas.

# **Partie II**

## **Contribution à la conception de chaînes logistiques**



# Chapitre 3. Problématique de choix de solution de conception de produit

## 3.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la problématique d'évaluation et de choix de solution de conception de produits.

Dans la section (3.2), nous précisons notre problématique liée aux choix de solutions de conception de produits. Ensuite, une représentation de l'espace de solutions de conception basée sur des graphes est proposée dans la section (3.3).

Une première tentative de recherche de meilleure solution par le calcul d'un compromis coût variable/coût fixe des solutions est exposée dans la section (3.4). Pour illustrer nos propos, nous présentons deux exemples d'application.

Enfin, les critiques que nous apporterons à cette procédure nous permettront de suggérer, dans la section (3.5), une approche intégrée de choix de solutions et de définition du réseau logistique.

## 3.2. Définition du problème

Dans la première partie de la thèse, une démarche et des outils d'aide à la conception de produits ont été développés. La démarche vise à la fois la satisfaction du besoin client et la réduction des délais de conception.

L'hypothèse fondatrice de la démarche de conception par pack est qu'il est possible d'identifier les segments de demande sur lesquels se ventile la demande d'une famille de produits ; chaque segment de demande correspondant à un besoin spécifique. Les études de marché sont utilisées pour identifier les segments de demande et pour déterminer les taux de répartition de la demande totale sur les différents segments. Pour répondre spécifiquement à un segment de demande, nous avons défini un pack. De plus, la conduite de notre démarche pour la conception de chaque pack peut générer une ou plusieurs nomenclatures possibles selon le choix de décomposition du pack (nombre et références de modules générés par la phase de décomposition du pack) ou les choix technologiques.

Il existe une relation d'ordre entre les différents segments de demande correspondant à une forme de niveau de service ou de performance du produit :  $Segment_i \succ Segment_{i-1}$ .

Cette relation d'ordre signifie que le niveau de service auquel correspond le  $Segment_i$  est supérieur à celui du  $Segment_{i-1}$ . Il en résulte qu'un pack,  $Pack_i$ , répondant à un segment de demande de niveau  $i$  est capable de couvrir tous les segments de demande de niveau inférieur ( $i-1, i-2, \dots, 1$ ). Cette situation correspond à du suréquipement par rapport au besoin.

Pour répondre à une demande totale d'un article, il faut donc déterminer :

- l'ensemble des packs pouvant couvrir toute la demande, et
- la nomenclature de chaque pack.

En conclusion, une solution  $S$  de conception est définie par :

- un ensemble de packs :  $S = \{Pack\_i, Pack_{i-1}, \dots, Pack_1\}$ , et
- une nomenclature pour chaque pack identifié :  $Pack\_i \rightarrow BOM$  avec  $Pack\_i \in S$ .

Pour notre exemple de câblage automobile, considérons par exemple que la demande totale du câblage est segmentée en quatre niveaux. Ces niveaux correspondent à quatre packs différents : niveau bas de gamme (pack  $P1$ ), premier niveau gamme moyenne (pack  $P2$ ), second niveau gamme moyenne (pack  $P3$ ) et niveau haut de gamme (pack  $P4$ ). Pour chaque pack, l'application de la démarche de conception a permis de générer plusieurs nomenclatures possibles. Ces nomenclatures se distinguent selon le nombre et la référence des modules générés lors de la phase de décomposition.

Pour la sélection de packs de câblage, plusieurs solutions sont possibles :

- Nombre de packs = 4 : cette solution consiste à sélectionner tous les packs identifiés. Chaque pack est conçu pour répondre à un seul segment de demande. Ainsi, la demande totale du câblage est satisfaite par les quatre packs qui correspondent aux quatre niveaux de service :  $S = \{P1, P2, P3, P4\}$ . Cette solution génère une forte diversité du nombre de références.
- Nombre de packs = 1 : cette solution consiste à sélectionner un seul pack pouvant répondre à tous les segments de demande. Ce pack doit correspondre avec le pack du plus haut niveau de service. Pour notre exemple, celui-ci concorde avec le pack haut de gamme :  $S = \{P4\}$ . C'est un câblage suréquipé par rapport au besoin total. Cette solution est alors caractérisée par une faible diversité du nombre de références mais génère des surcoûts importants du fait du suréquipement.
- $1 < \text{Nombre de packs} < 4$  : ce sont des solutions intermédiaires ayant moins de références à gérer que la première solution et moins de surcoûts de suréquipement que la seconde solution. Dans ce cas, les solutions possibles que nous pouvons identifier sont :  $S = \{P1, P4\}$ ,  $S = \{P2, P4\}$ ,  $S = \{P3, P4\}$ ,  $S = \{P1, P2, P4\}$ ,  $S = \{P1, P3, P4\}$  et  $S = \{P2, P3, P4\}$ .

Notons que pour satisfaire la demande totale, toutes les solutions doivent contenir au moins le pack  $P4$ . En effet, ce pack correspond au pack du plus haut niveau de service.

### 3.3. Représentation de l'espace de solutions

Une solution  $S$  de conception est définie par :

- un ensemble de packs, et
- une nomenclature pour chaque pack identifié.

L'objectif de cette section est de représenter le problème sous la forme d'un graphe pour dériver une notion de nomenclature générique.

### 3.3.1. Graphe "Demande"

Nous représentons l'espace des solutions possibles de packs par un graphe sans cycle, que nous appelons "*Graphe Demande*".

Le graphe de la demande est défini par trois niveaux de sommets :

- la source : ce sommet correspond à la demande totale de l'article (*Demande*),
- les nœuds : chaque nœud du graphe correspond à un segment de demande (*Segment<sub>i</sub>*) représentant les niveaux de services sur lesquels la demande totale est ventilée,
- les puits : les puits représentent l'ensemble des packs (*Pack<sub>i</sub>*) pouvant satisfaire les différents segments de demande.

Ces sommets peuvent être de type :

- sommets en "*ET*" : ce sont des sommets pour lesquels il faut satisfaire tous les successeurs. La sélection d'un sommet en "*ET*" implique la sélection de tous ses successeurs,
- sommets en "*OU*" : ce sont des sommets pour lesquels il faut satisfaire uniquement un des successeurs. La sélection d'un sommet en "*OU*" implique la sélection d'un et un seul de ses successeurs.

Les arcs du graphe de la demande définissent deux types de liens :

- Les liens source  $\rightarrow$  nœuds (*Demande*  $\rightarrow$  *Segment<sub>i</sub>*) : la demande totale de l'article se ventile sur plusieurs segments de demande. Pour répondre à la demande, tous les segments doivent être satisfaits. La source est alors un sommet en "*ET*" et à chaque arc (*Demande*  $\rightarrow$  *Segment<sub>i</sub>*) est attachée une valuation correspondant au pourcentage de ventilation ou de répartition de la demande totale.
- Les liens nœuds  $\rightarrow$  puits (*Segment<sub>i</sub>*  $\rightarrow$  *Pack<sub>i</sub>*) : un segment de demande peut être couvert par plusieurs packs. Pour répondre à un segment, un et un seul pack doit être sélectionné. Les nœuds sont alors des sommets en "*OU*" et à chaque arc (*Segment<sub>i</sub>*  $\rightarrow$  *Pack<sub>i</sub>*) est associée la valeur 1.

En conclusion, l'espace des solutions de packs est représenté par un graphe sans cycle avec un "*ET*" sur la source et des "*OU*" sur les nœuds.

La Figure 3.1 propose, pour notre exemple avec quatre packs, un graphe de la demande de câblage avec toutes les solutions de packs, où la demande totale du câblage est ventilée sur quatre segments comme suit :

- *Segment<sub>1</sub>* (niveau bas de gamme) : 20 % de la demande,
- *Segment<sub>2</sub>* (premier niveau gamme moyenne) : 30 % de la demande,
- *Segment<sub>3</sub>* (second niveau gamme moyenne) : 30 % de la demande, et
- *Segment<sub>4</sub>* (niveau haut de gamme) : 20 % de la demande.

Les solutions possibles de satisfaction de chaque segment par les quatre packs sont, par exemple :

- le *Segment\_1* peut être satisfait par (*P1*), (*P2*), (*P3*) ou (*P4*),
- le *Segment\_2* peut être satisfait par (*P2*), (*P3*) ou (*P4*),
- le *Segment\_3* peut être satisfait par (*P3*) ou (*P4*),
- le *Segment\_4* ne peut être satisfait que par (*P4*).

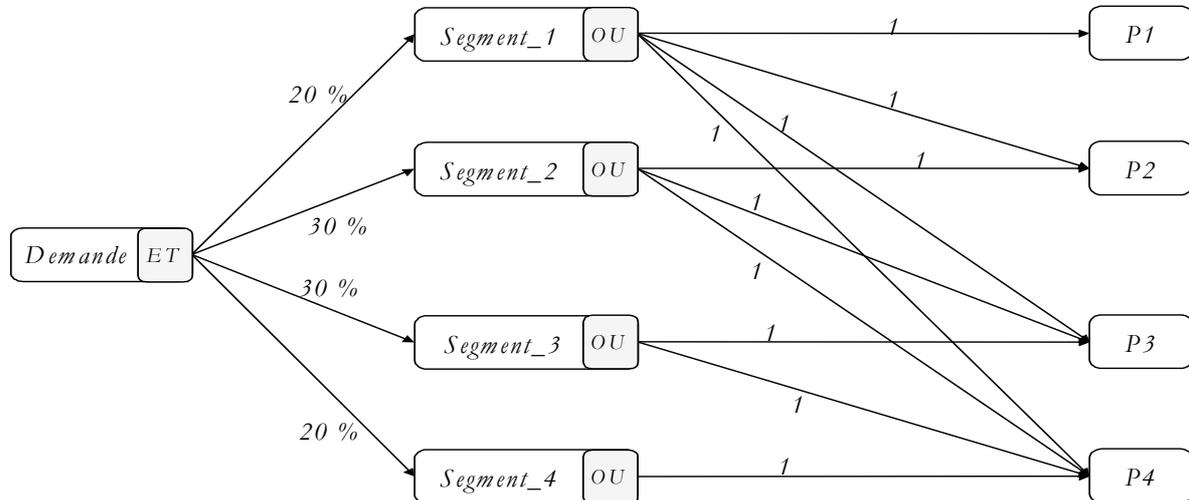


Figure 3.1 – Graphe "Demande"

### 3.3.2. Graphe "Pack"

Nous représentons l'espace des solutions de nomenclatures de packs par un autre graphe sans cycle, que nous appelons "*Graphe Pack*".

Trois niveaux de sommets sont définis dans le graphe de pack :

- les sources : les sources du graphe de pack correspondent aux différents packs identifiés (*Pack<sub>i</sub>*),
- les nœuds : les nœuds du graphe définissent les nomenclatures possibles (*BOM*) de chaque pack,
- les puits : les puits désignent les modules (*Mod*) pouvant constituer chaque nomenclature (*BOM*).

Ces sommets peuvent être également en "*ET*" ou en "*OU*".

Les arcs du graphe pack définissent deux types de liens :

- Les liens source  $\rightarrow$  nœuds (*Pack<sub>i</sub>*  $\rightarrow$  *BOM*) : pour un pack, il existe plusieurs nomenclatures alternatives. Pour définir un pack, une et une seule nomenclature (*BOM*) doit être sélectionnée. Les sources (*Pack<sub>i</sub>*) sont alors des sommets en "*OU*" et à chaque arc (*Pack<sub>i</sub>*  $\rightarrow$  *BOM*) est associée la valeur 1.
- Les liens nœuds  $\rightarrow$  puits (*BOM*  $\rightarrow$  *Mod*) : une nomenclature (*BOM*) se décompose en plusieurs modules (*Mod*). La sélection d'une nomenclature implique la sélection de tous ses modules. Les nœuds (*BOM*) sont alors des sommets en "*ET*" et aux arcs (*BOM*  $\rightarrow$  *Mod*) sont attribuées des valeurs correspondant aux valeurs de liens de nomenclature classique (de type composé  $\rightarrow$  composant).

En conclusion, l'espace des solutions de nomenclatures de packs est représenté par un graphe sans cycle avec des "OU" sur les sources et des "ET" sur les nœuds.

Dans le cas du câblage, nous illustrons par la Figure 3.2 un exemple de graphe de pack. Il existe plusieurs solutions de nomenclature pour chaque pack (les nœuds *BOM\_1.1* à *BOM\_4.2*). Une nomenclature est composée de plusieurs modules (modules 17 à 64). Par exemple, le pack (*P3*) présente deux solutions de nomenclature : la nomenclature (*BOM\_3.1*) est composée des modules (22, 27, 31, 40, 45, 49, 55 et 60, 62, *C1*) et la nomenclature (*BOM\_3.2*) est composée des modules (23, 28, 34, 37, 44, 50, 51, *C2*).

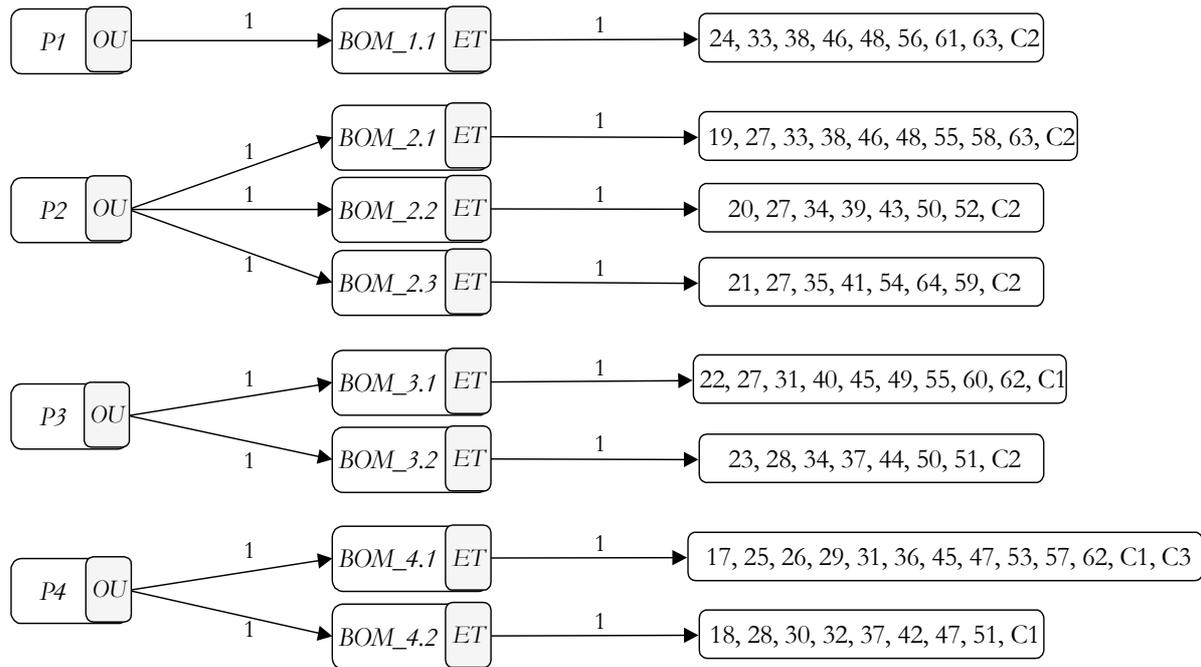


Figure 3.2 – Graphe "Pack"

### 3.3.3. Nomenclature Générique

Nous dénommons le graphe complet (*Graphe "Demande"* et *Graphe "Pack"*) par le terme "*Nomenclature Générique*" que nous représentons par la Figure 3.3.

La nomenclature générique fait apparaître deux types de sommets qui correspondent à deux types d'articles :

- des articles logiques (*Demande*, *Segment*, *Pack*) qui ne sont jamais fabriqués, stockés et transportés,
- des articles physiques (*BOM*, *Mod*) qui peuvent être fabriqués, stockés et transportés.

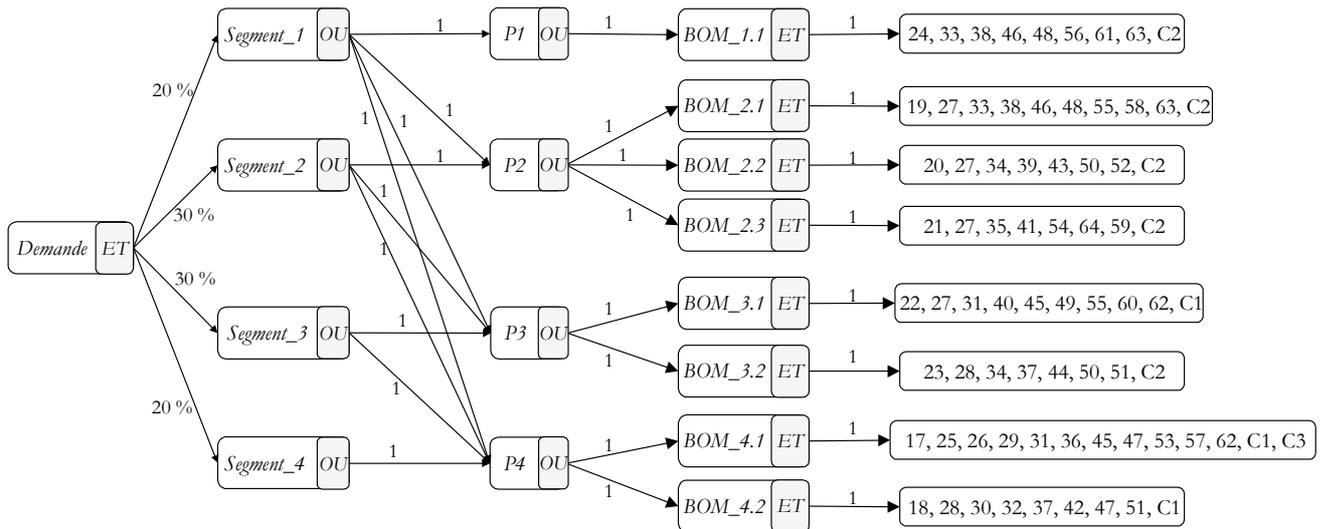


Figure 3.3 – Nomenclature générique

En conclusion, l'ensemble des solutions de conception est représenté par un graphe sans cycle avec des "ET" et des "OU" sur les différents sommets. La problématique abordée dans cette seconde partie est de lever les "OU" sur les sommets du graphe.

### 3.4. Première recherche de solution pour la diversité

#### 3.4.1. Problème et hypothèses

Les problématiques de diversité et de suréquipement de produits sont principalement significatives pour le problème de choix de packs. Ce premier chapitre est consacré à une première approche de choix de packs. Pour montrer cette approche sur le graphe de la demande (choix de packs uniquement), nous supposons que les choix de nomenclatures de packs sur le graphe de pack sont déjà effectués. Par conséquent, les coûts liés à un pack correspondent aux différents coûts liés à sa nomenclature.

Le problème que nous traitons est d'identifier l'ensemble de packs pouvant satisfaire une demande ventilée sur plusieurs segments de besoins en minimisant un coût global ( $CG$ ). Pour cela, nous considérons que le coût global prend en compte deux types de coûts :

- un coût fixe lié à l'existence des packs : coût fixe noté  $(CF_{Pack\_i})$  associé à un pack  $(Pack\_i)$  correspondant entre autre à un coût de gestion,
- un coût variable, proportionnel aux quantités fabriquées de chaque pack : coût variable unitaire noté  $(CV_{Pack\_i})$  associé à un pack  $(Pack\_i)$ . Il regroupe entre autre les coûts de matières, de main-d'œuvre, de fabrication et d'assemblage de la nomenclature du pack.

Il en résulte :

- le coût fixe total d'une solution  $S$  :  $CF = \sum_i CF_{Pack\_i}$  avec  $Pack\_i \in S$ ,

- le coût variable total d'une solution  $S$  :  $CV = \sum_i (QTE_{Pack\_i} \cdot CV_{Pack\_i})$  tel que  $QTE_{Pack\_i}$  est la quantité de chaque pack  $Pack\_i \in S$ ,
- le coût global d'une solution  $S$  :  $CG = CF + CV$ .

Les coûts moyens par unité sont alors :

- le coût fixe moyen unitaire ( $CFMU$ ) d'une solution est égal au coût fixe total sur la somme des quantités des packs (demande totale) :  $CFMU = \frac{CF}{\sum_i QTE_{Pack\_i}}$ ,
- le coût variable moyen unitaire ( $CVMU$ ) d'une solution est égal au coût variable total de la solution sur la somme des quantités des packs (demande totale) :  $CVMU = \frac{CV}{\sum_i QTE_{Pack\_i}}$ ,
- le coût global moyen unitaire ( $CGU$ ) d'une solution  $S$  est calculé par la somme du coût fixe moyen unitaire ( $CFMU$ ) et du coût variable moyen unitaire ( $CVMU$ ) :  

$$CGU = CFMU + CVMU = \frac{CG}{\sum_i QTE_{Pack\_i}}.$$

Nous définissons la diversité d'une solution par le nombre de packs sélectionnés pour satisfaire tous les segments de demande.

La relation entre le coût global et la diversité des différentes solutions fait apparaître trois situations :

- Diversité minimum (nombre de pack = 1) : cette solution consiste à couvrir toute la demande avec un seul pack. Cette solution est intéressante dans le cas où les coûts fixes seraient élevés et que les coûts variables seraient proches.
- Diversité maximum (nombre de pack = nombre de segments de demande) : cette situation génère un pack par segment de besoin. C'est une solution qui peut être avantageuse si les coûts fixes sont très faibles et les coûts variables très différents.
- Diversités intermédiaires ( $1 < \text{nombre de packs} < \text{nombre de segments de demande}$ ) : ce sont des solutions intermédiaires devant permettre de trouver un compromis entre les coûts fixes et les coûts variables.

Le choix d'une meilleure solution de packs sur le graphe de la demande consiste à sélectionner l'ensemble de packs qui satisfassent tous les segments de demande et qui minimisent le coût global (diversité à coût minimum). Elle réalise un compromis entre le coût d'existence des packs de la solution et le coût variable dû essentiellement au coût de suréquipement.

### 3.4.2. Principe de recherche de solution

Le principe de recherche de solution consiste à déterminer le coût global de chaque solution et à sélectionner ensuite la solution ayant le plus faible coût global.

A partir du graphe de la demande, nous énumérons les solutions possibles de choix de pack que nous souhaitons évaluer. Nous obtenons ainsi un graphe de solutions (exemple de la Figure 3.4).

Le graphe de solutions est défini par trois niveaux de sommets :

- la racine : la racine de l'arbre correspond à la demande totale de l'article (Demande),
- les nœuds intermédiaires : chaque nœud intermédiaire de l'arbre correspond à une solution de choix de packs (SOL),
- les feuilles : chaque feuille représente un pack (Pack<sub>*i*</sub>).

Les arcs du graphe de la demande définissent deux types de liens :

- Les liens racine → nœuds (Demande → SOL) : chaque solution de packs peut couvrir la demande totale. Donc, pour satisfaire toute la demande, une est une seule solution est sélectionnée. La racine est alors un sommet en "OU" et à chaque arc (Demande → SOL) est associée la valeur 1.
- Les liens nœuds → feuilles (SOL → Pack<sub>*i*</sub>) : une solution de choix de packs est composée de un ou plusieurs packs. Ainsi, la sélection d'une solution de choix de packs implique la sélection des packs composant la solution. Les nœuds intermédiaires sont donc des sommets en "ET". A chaque arc (SOL → Pack<sub>*i*</sub>) est attachée une valuation (SOL%Pack<sub>*i*</sub>) correspondant au pourcentage de ventilation de la demande totale sur le pack (Pack<sub>*i*</sub>) d'après les packs présents dans la solution considérée.

En conclusion, l'espace de solutions de choix de packs est représenté par un graphe de solutions avec un "OU" sur la racine et des "ET" sur les nœuds intermédiaires.

- Principe de calcul des valeurs (SOL%Pack<sub>*i*</sub>) :

Pour chaque segment de demande, nous avons son pourcentage de la demande, noté (D%Segment<sub>*i*</sub>). Etant donnée l'hypothèse d'une relation d'ordre entre les segments de demande, un segment (Segment<sub>*i*</sub>) est affecté au premier pack dans la solution (SOL) qui, lui, est de niveau supérieur ou égal.

Il en résulte la valuation de chaque arc (SOL → Pack<sub>*i*</sub>) :  $SOL\%Pack\_i = \sum_j D\%Segment\_j$ , tel que (Segment<sub>*j*</sub>) est affecté au (Pack<sub>*i*</sub>).

- Principe de calcul du coût global d'une solution :

Soit (QDe), la quantité de la demande totale. Le coût global CG d'une solution S est calculé comme suit :  $CG = \sum_i (QDe \cdot SOL\%Pack\_i \cdot CV_{Pack\_i} + CF_{Pack\_i})$  avec Pack<sub>*i*</sub> ∈ S.

### 3.4.3. Exemple

Dans cette section, nous montrons le principe de calcul des coûts sur l'exemple précédent de solutions de packs du câblage automobile. Nous rappelons que l'espace des solutions est constitué de huit solutions possibles de choix de packs :

$SOL \in \{\{P4\}; \{P1, P4\}; \{P2, P4\}; \{P3, P4\}; \{P1, P2, P4\}; \{P1, P3, P4\}; \{P2, P3, P4\}; \{P1, P2, P3, P4\}\}$ .

Avec un objectif de cible médiane entre deux niveaux de packs, nous retenons dans notre cas les cinq solutions suivantes :

- $Sol_1$  : quatre packs  $\{P1, P2, P3, P4\}$ ,
- $Sol_2$  : trois packs  $\{P1, P2, P4\}$ ,
- $Sol_3$  : trois packs  $\{P2, P3, P4\}$ ,
- $Sol_4$  : deux packs  $\{P2, P4\}$ , et
- $Sol_5$  : un pack  $\{P4\}$ .

Nous supposons que les coûts fixes et variables de chaque pack identifié sont connus et ils sont donnés dans le Tableau 3.1 en unités monétaires ( $u.m.$ ).

<i>Packs</i>	<i>Coût variable unitaire</i> ( $CV_{Pack_i}$ )	<i>Coût fixe unitaire</i> ( $CF_{Pack_i}$ )
<i>P1</i>	800 <i>u.m.</i>	5000 <i>u.m.</i>
<i>P2</i>	1000 <i>u.m.</i>	5000 <i>u.m.</i>
<i>P3</i>	1200 <i>u.m.</i>	5000 <i>u.m.</i>
<i>P4</i>	1500 <i>u.m.</i>	5000 <i>u.m.</i>

Tableau 3.1 – Exemple de coûts fixes et variables unitaires de packs

Pour illustrer la dépendance entre la diversité des solutions et le volume de la demande, nous présentons deux exemples de recherche de solutions correspondant à deux demandes totales : 100 et 1000 unités du produit. Le Tableau 3.2 montre, pour notre exemple, le principe de calcul des valeurs ( $SOL\%Pack_i$ ).

<i>Segments</i>	<i>Segment_1</i>	<i>Segment_2</i>	<i>Segment_3</i>	<i>Segment_4</i>	<i>SOL%Pack_i</i>			
<i>D%Segment_i</i>	0,2	0,3	0,3	0,2	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>
<i>Sol_1</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	0,2	0,3	0,3	0,2
<i>Sol_2</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P4</i>	<i>P4</i>	0,2	0,3	/	0,5
<i>Sol_3</i>	<i>P2</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	/	0,5	0,3	0,2
<i>Sol_4</i>	<i>P2</i>	<i>P2</i>	<i>P4</i>	<i>P4</i>	/	0,5	/	0,5
<i>Sol_5</i>	<i>P4</i>	<i>P4</i>	<i>P4</i>	<i>P4</i>	/	/	/	1

Tableau 3.2 – Exemple de calcul de la répartition des packs par solution

La Figure 3.4 illustre le graphe de solutions pour le choix de solution dans le cas d'une demande égale à 100 unités. Le même principe de calcul est appliqué pour la recherche de solution pour une demande de 1000.

Après calcul des coûts, la solution à moindre coût est la solution (*Sol\_3*) définie par : 50 unités de (*P2*), 30 unités de (*P3*) et 20 unités de (*P4*). Le segment de demande (*Segment\_1*) est satisfait par le pack (*P2*). Pour ce segment de demande, le pack de câblage est suréquipé par rapport au besoin.

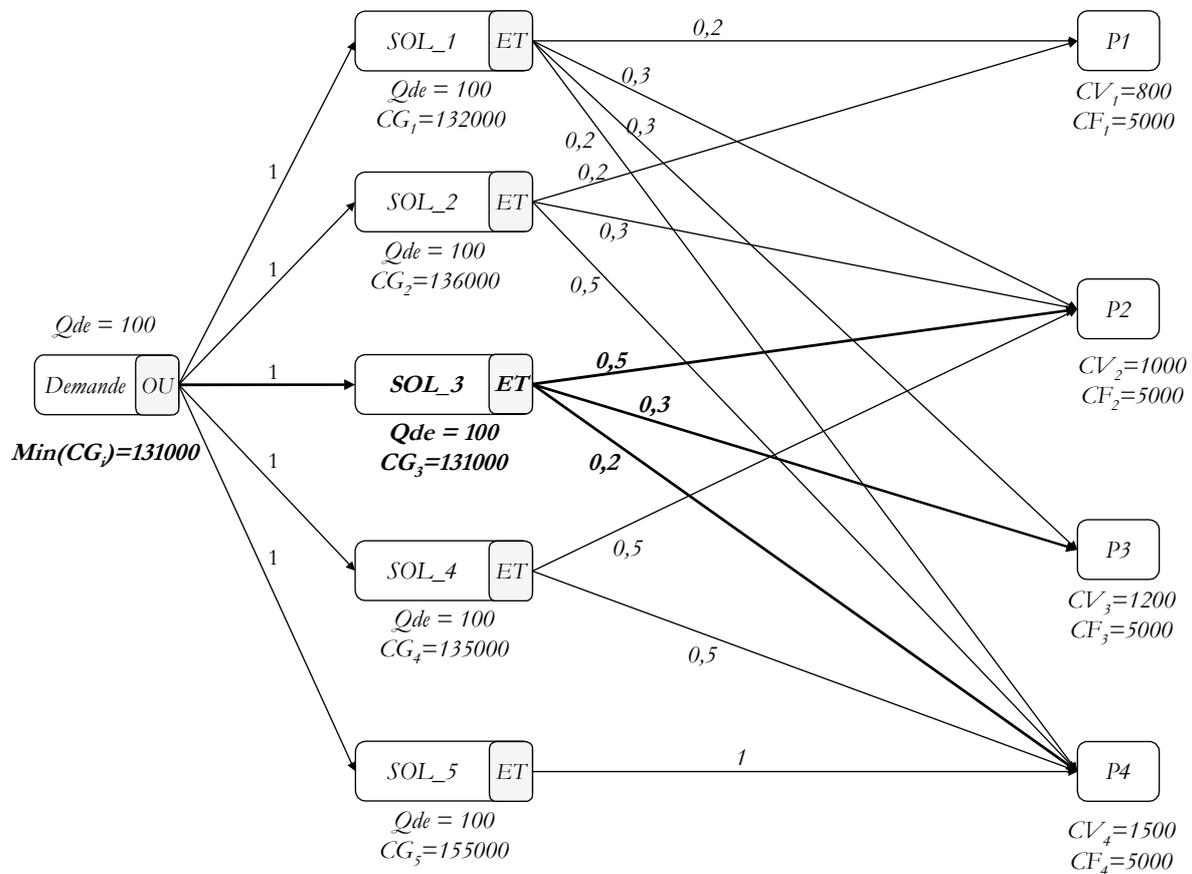


Figure 3.4 – Graphe de solutions et principe de calcul du coût global

Dans ce qui suit, nous résumons le calcul des différents coûts liés à la solution *Sol\_3* :

- le coût variable total :  $CVSol_3 = (50.1000 + 30.1200 + 20.1500) = 116000$  u.m,
- le coût variable moyen unitaire :  $CVMUSol_3 = CVSol_3/100 = 1160$  u.m,
- le coût fixe total :  $CFSol_3 = (5000 + 5000 + 5000) = 15000$  u.m,
- le coût fixe moyen unitaire :  $CFMUSol_3 = CFSol_3/100 = 150$  u.m,
- le coût global :  $CGSol_3 = CVSol_3 + CFSol_3 = 116000 + 15000 = 131000$  u.m,
- le coût global moyen unitaire :  $CGUSol_3 = CGSol_3/100 = CVMUSol_3 + CFMUSol_3 = 1310$  u.m,

A présent, si nous considérons le problème précédent mais avec une demande de 1000 unités, nous obtenons une solution, à moindre coût global, constituée de quatre packs. Cette solution regroupe 200 unités de (*P1*), 300 unités de (*P2*), 300 unités de (*P3*) et 200 unités de (*P4*).

Nous récapitulons dans le Tableau 3.3 les différents résultats des deux exemples précédents. Ce tableau résume également les différents coûts de toutes les solutions de l'arbre de décision pour des demandes de 100 et 1000 unités.

Les solutions réalisables	Nombre de packs	Demande = 100			Demande = 1000		
		CVMU	CFMU	CGU	CVMU	CFMU	CGU
(P1-P2-P3-P4)	4	1120	200	1320	1120	20	<b>1140</b>
(P2-P3-P4)	3	1160	150	<b>1310</b>	1160	15	1175
(P1-P2-P4)	3	1210	150	1360	1210	15	1225
(P2-P4)	2	1250	100	1350	1250	10	1260
(P4)	1	1500	50	1550	1500	5	1505

Tableau 3.3 – Evolution des coûts de solutions suivant la demande

Nous remarquons que le coût variable moyen unitaire (CVMU) d'une solution ne varie pas selon la demande si nous négligeons l'effet résultant des économies d'échelle. Quant au coût fixe moyen unitaire (CFMU), il augmente avec la diminution de la demande. Pour des demandes différentes, le coût fixe total d'une solution reste constant. Or, dépendant du nombre de packs sélectionnés, ce coût fixe total ramené à l'unité du produit (divisé par la demande) diminue avec l'augmentation de la demande.

Pour une demande donnée, le coût variable moyen unitaire (CVMU) diminue donc avec l'augmentation du nombre de packs des solutions (diversité des solutions) contrairement au coût fixe moyen unitaire (CFMU) qui augmente. Les résultats de ces deux exemples confirment ainsi la variation des coûts moyens unitaires de revient et de gestion en fonction du niveau de diversité des solutions et de la variation de la demande.

Sur la Figure 3.5, nous représentons la variation des différents coûts unitaires (CGU, CFMU, CVMU) des solutions en fonction de leur diversité.

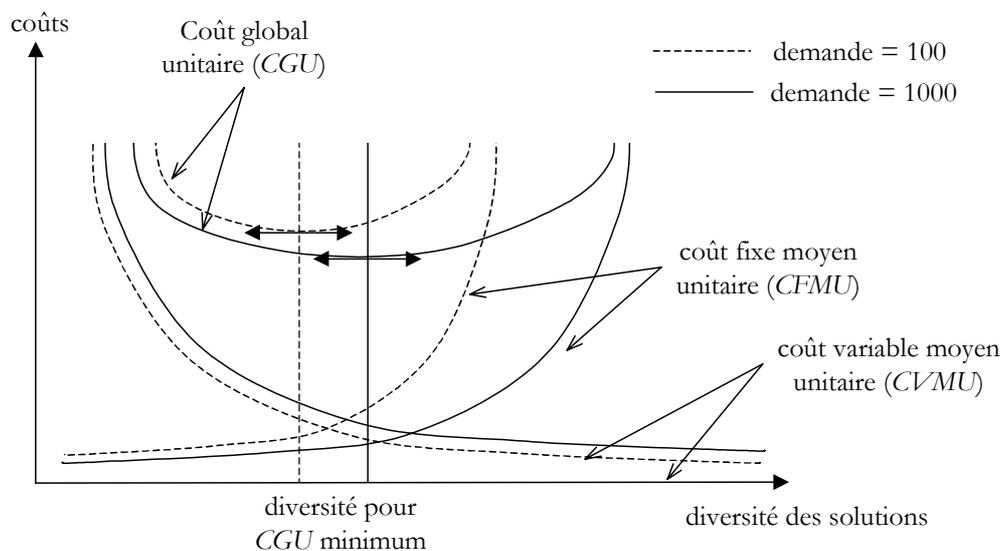


Figure 3.5 – Coûts unitaires et degrés de diversité des solutions

### 3.5. Besoin de prise en compte de la chaîne logistique

Le principe de recherche de solution proposé dans la section (3.4), permet d'identifier un ensemble de packs en fonction de la demande. Pour cela, nous nous sommes basés sur le calcul d'un coût global de solution. Cette approche aurait pu être étendue au problème complet incluant simultanément les choix de packs et les choix de nomenclature en utilisant la nomenclature générique.

L'inconvénient majeur de cette approche est de considérer les coûts variables figés et indépendants de la logistique.

Or, les variables de décision liées au dimensionnement de la chaîne logistique influent largement sur ces coûts (choix de délocalisation, choix des moyens de production, choix de moyens de transport). Cette approche n'est donc utilisable que dans la mesure où la chaîne logistique est figée.

La prise en compte des éléments de la chaîne logistique nous conduit à proposer une autre approche de recherche de solution de conception de produits. Cette approche doit intégrer simultanément le problème de choix de solution de conception de produits et le problème de dimensionnement de chaîne logistique.

Le but principal de la recherche d'une nomenclature spécifique de produit et d'une configuration spécifique de son réseau logistique est de répondre à une demande produit prévisionnelle. Celle-ci est donnée sur plusieurs périodes couvrant un horizon de planification à long terme.

En conclusion, nous aboutissons à un problème de planifications stratégique et tactique de chaîne logistique. La résolution de ce problème consiste à la fois à rechercher la meilleure solution de conception de produit et à définir la structure à moindre coût de son réseau logistique. Cette solution doit répondre à une demande prévisionnelle multi-périodes.

# Chapitre 4. Etat de l'art : conception et configuration de chaîne logistique

## 4.1. Introduction

La compétitivité d'une entreprise réside de plus en plus dans sa capacité à réduire tous ses cycles (conception, approvisionnement, production, transport et livraison). La réactivité est ainsi devenue le mot d'ordre de l'entreprise. Elle est définie comme étant la faculté de conserver une adéquation entre la productivité de l'entreprise et l'adaptation aux besoins du client. Pour atteindre cette réactivité, il est nécessaire de faire dialoguer de manière optimisée tous les partenaires impliqués dans la chaîne traversée par les flux d'articles allant du fournisseur (l'offre) au client (la demande). Cette vision de la gestion implique non seulement d'avoir une vue globale et intégrée de l'entreprise mais également d'intégrer les besoins des clients et les contraintes des fournisseurs.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux différentes études qui couvrent les trois fonctions présentes dans une chaîne logistique : l'approvisionnement, la production et la distribution.

Dans les sections (4.2 et 4.3), nous introduisons quelques définitions relatives à la chaîne logistique et à sa gestion. La section suivante (4.4) traite de la notion de planification de la chaîne logistique.

Nous synthétisons dans la section (4.5), un ensemble de modèles, développés pour la conception et la configuration de réseaux logistiques multi-sites de production et de distribution dans le cadre de planification stratégique et/ou tactique.

## 4.2. Définitions

Le terme logistique est défini comme l'ensemble des actions de planification, d'implémentation et de contrôle de flux de matières premières, des encours, des articles finis et des informations correspondantes, depuis l'origine jusqu'au point de consommation, dans le but de satisfaire les besoins des clients. La logistique touche tous les domaines de l'entreprise : la coordination de l'offre et de la demande, la maîtrise des opérations de transfert et de stockage, la production et l'approvisionnement, la distribution, le service après-vente et le soutien des articles.

[Lee et Billington, 1992] définissent une chaîne logistique comme un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières ou en articles semi-finis, le transport de matières premières, la transformation de matières premières en composants, en articles semi-finis puis en articles finis et enfin le stockage et la distribution des articles finis vers les clients. Le terme installation peut correspondre à une unité de stockage, une unité de production, une usine, un fournisseur, un centre de distribution, un entrepôt ou un client. La chaîne logistique la plus élémentaire est constituée d'une seule installation assurant aussi bien la production que le stockage et la distribution. Des réseaux plus complexes, destinés par exemple à

l'industrie automobile ou à la fabrication d'ordinateurs, peuvent coordonner plusieurs dizaines d'installations mondialement réparties. Bien qu'étant, à l'origine, centrée sur le fonctionnement d'une entreprise, cette définition de la chaîne logistique s'étend facilement au contexte des entreprises en réseau, ou entreprise étendue.

Comme illustré par la Figure 4.1, le réseau logistique se représente à l'aide d'un ensemble de nœuds et d'arcs. Les nœuds du réseau correspondent aux sites et aux installations où les articles sont créés, fabriqués, stockés et consommés (fournisseurs, usines, centres de distribution, entrepôts, clients). Les arcs reliant les différents nœuds modélisent les flux de matières. Le réseau logistique global peut donc se décomposer en trois sous-réseaux : un réseau d'approvisionnement, un réseau de production, et un réseau de distribution.

Chacun de ces sous-réseaux a un rôle bien déterminé. Le premier a pour mission de fournir aux centres de production des matières premières, des composants en quantités demandées et en respectant les délais. Le second, quant à lui, transforme, fabrique ou assemble les matières et composants afin d'obtenir des articles finis. Enfin, le troisième sous-réseau s'occupe du stockage, du transport des articles finis et assure leur livraison aux clients.

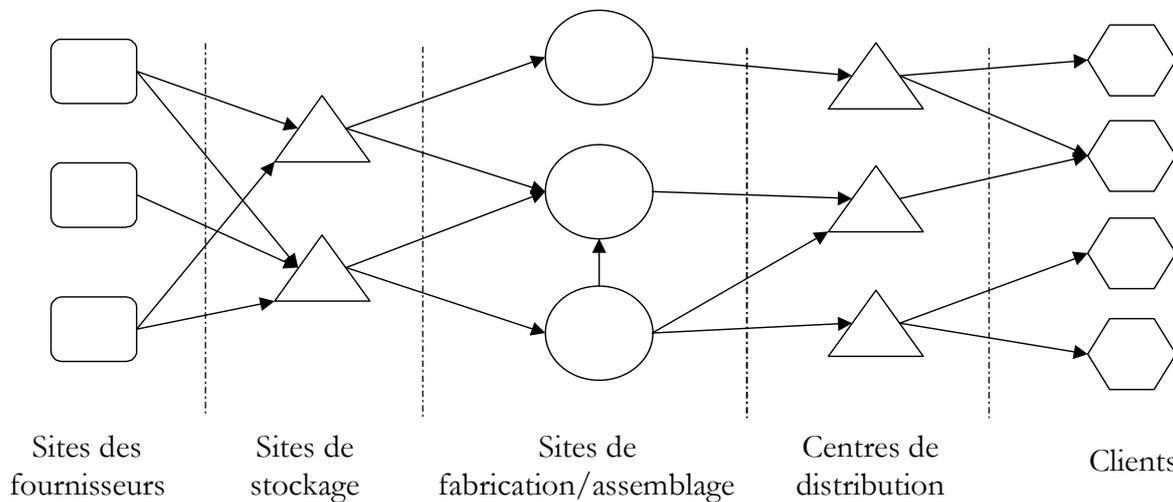


Figure 4.1 – Représentation d'un réseau logistique

Une chaîne logistique fait donc apparaître plusieurs relations de type client/fournisseur (Figure 4.2) ainsi que les fonctions d'approvisionnement, de production et de distribution [Stadler, 2000].

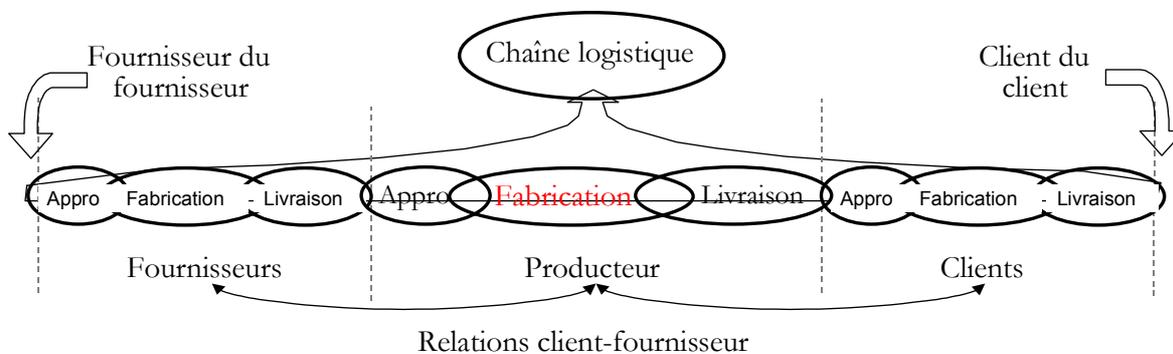


Figure 4.2 – Fonctions et entités présentes dans un réseau logistique

### 4.3. Gestion de la chaîne logistique

La gestion de la chaîne logistique consiste à piloter l'ensemble des organisations et installations qui concourent à la réalisation et à la mise à disposition des articles. Elle vise d'une part à fabriquer les articles en s'appuyant sur les informations issues des prévisions de la demande des clients et d'autre part, à minimiser les différents coûts d'approvisionnement, de production, de stockage et de livraison. Elle comprend généralement deux principales composantes, l'intégration du réseau d'installations et la coordination des différents flux de matières, d'information et financiers.

Autrefois, les fonctions approvisionnement, production et distribution d'une chaîne logistique étaient gérées de manière indépendante. Actuellement, un produit devient compétitif non seulement grâce à une bonne gestion de chacune des fonctions précédentes mais également suivant une meilleure intégration entre les décisions de différents niveaux de ces fonctions. Nous insistons sur le fait d'intégrer toutes les décisions de la chaîne logistique car une maîtrise de chacune des fonctions de la chaîne n'implique pas forcément une maîtrise globale de toute la chaîne.

[Masters et Pohlen, 1994] décrivent l'évolution de la gestion de la chaîne logistique en trois phases. Durant la première période, gestion fonctionnelle, toutes les fonctions d'une entreprise sont gérées séparément. Vient ensuite l'intégration interne, pour laquelle la gestion de toutes les fonctions d'une même installation est unifiée et devient la responsabilité d'un seul individu et enfin l'intégration externe, pour laquelle la gestion de toutes les fonctions et de toutes les installations de la chaîne logistique est unifiée et nécessite coopération et coordination. Il est donc nécessaire de maîtriser l'ensemble des processus définissant la chaîne logistique pour pouvoir répondre aux besoins et exigences du marché dans des délais courts. Ainsi, la compétitivité d'un produit est étroitement liée à la gestion de sa chaîne logistique appropriée.

Pour apprécier le niveau de gestion d'une chaîne logistique, un certain nombre de mesures de performance de la chaîne logistique ont été proposées [Narahari et Biswas, 2000]. D'un côté, des mesures qualitatives permettant d'évaluer la qualité des articles et le niveau de satisfaction des clients de la chaîne, et d'un autre côté, des mesures quantitatives telles que le délai commande livraison, la flexibilité, l'utilisation des ressources. Les mesures quantitatives peuvent être soit financières (par exemple le chiffre d'affaires de la chaîne, les coûts à base d'activités, les coûts de stockage, les coûts de transport, les coûts de retard de livraison.) ou non financières (tels que le temps de cycle, le niveau de service, les niveaux de stock, l'utilisation des ressources).

Toutefois, c'est au niveau de la gestion long terme que s'aborde notre problématique de dimensionnement d'une chaîne logistique. Une chaîne logistique peut être vue comme une seule entité guidée par un processus de prise de décision stratégique. Une gestion globale de la chaîne logistique entraîne une complexification des décisions à prendre et des choix à faire. Cette coordination globale n'est concevable que dans le cas d'entreprises multi-sites ou encore dans le cas d'une chaîne logistique centrée sur un acteur principal (industries automobile et aéronautique).

### 4.4. Planification de la chaîne logistique

La planification de la chaîne logistique consiste à optimiser les activités d'approvisionnement, de production et de distribution des articles, en se basant sur la demande prévisionnelle des clients. Les objectifs principaux de la planification sont de réduire les stocks à tous les niveaux, de satisfaire la demande des clients dans les délais et d'utiliser de façon optimale les moyens.

La planification d'une chaîne logistique nécessite de prendre un ensemble de décisions à des niveaux différents. La planification monolithique, qui intègre tous les niveaux de décision, est généralement difficile à mettre en œuvre du fait de la complexité et de la taille des problèmes d'aide à la décision [Narahari et Biswas, 2000]. C'est pour cette raison que la mise en œuvre de la planification de la chaîne logistique est généralement hiérarchique (planifications successives).

Les différentes décisions de planification de la chaîne logistique sont donc classées selon les fonctions du réseau logistique et selon l'horizon temporel.

#### **4.4.1. Classification fonctionnelle**

Les décisions de planification regroupent les décisions d'approvisionnement, de production et de distribution.

##### **4.4.1.1. Décisions d'approvisionnement**

Les décisions relatives à l'approvisionnement sont celles qui permettent de définir la structure du sous-réseau approvisionnement. Les principales décisions portent sur le choix de Faire ou Faire-Faire, le nombre et le choix de fournisseurs, l'affectation des fournisseurs aux sites de production et la définition du programme d'approvisionnement.

##### **4.4.1.2. Décisions de production**

Les décisions qui concernent la fonction production (le sous-réseau de production) sont principalement la localisation d'usines (nombre d'usines, où se situe chacune d'elles), l'allocation des articles aux sites de production, le choix de ligne de production (articles à fabriquer dans chaque site de production), la planification de la capacité dans chaque usine et l'affectation de la capacité aux articles, les décisions sur les stocks (articles à stocker dans chaque centre de stockage, les niveaux des stocks) et l'ordonnancement de la production.

##### **4.4.1.3. Décisions de Distribution**

Le dimensionnement du réseau de distribution regroupe essentiellement la configuration des centres de distribution (types de centres de distribution à utiliser), la localisation des centres de distribution, la définition de la politique de transport, l'affectation des clients aux centres de distribution et l'allocation des articles aux centres de distribution et aux clients.

#### **4.4.2. Décisions temporelles**

Les décisions relatives à la gestion et à la planification de la chaîne logistique sont nombreuses et couvrent les différents horizons de la prise de décision : court, moyen et long termes.

##### **4.4.2.1. Décisions stratégiques**

Les décisions stratégiques d'une chaîne logistique sont celles qui déterminent la structure de la chaîne. Elles permettent d'évaluer les alternatives de configuration de la chaîne logistique. Elles sont prises pour un horizon de planification à long terme (mensuel, annuel ou sur plusieurs années) sur la base des prévisions de ventes annuelles, généralement agrégées par familles d'articles [Dejax, 2001].

Il s'agit en particulier :

- de la conception ou de l'adaptation de la structure industrielle et logistique (choix des implantations, dimensionnement des capacités des sites, affectation des familles d'articles aux sites) ;
- de la définition des politiques d'approvisionnement, de production, de distribution, de transport ;
- de la définition de la politique de ressources humaines à long terme.

#### 4.4.2.2. Décisions tactiques

La planification tactique reflète les décisions à prendre sur un horizon allant de quelques jours à quelques mois. Les décisions prises à moyen terme permettent de fournir les différentes ressources physiques et informationnelles nécessaires à la production et à la distribution (hommes, équipement et matières).

La gestion de la chaîne logistique au niveau de la planification à moyen terme s'inscrit dans le cadre du problème dit de "planification multi-site" [Thierry, 1994] et permet d'établir un pont entre les deux niveaux stratégique et opérationnel.

Les décisions tactiques reposent sur les modalités de circulation des articles dans le réseau logistique conçu au niveau stratégique. Elles regroupent l'affectation des fournisseurs aux sites de production, l'allocation des articles aux sites de production, la définition des niveaux de production de chaque site, l'allocation des centres de distribution aux clients et le dimensionnement des niveaux de stocks.

#### 4.4.2.3. Décisions opérationnelles

Les décisions opérationnelles assurent, à court terme, la gestion des moyens de la chaîne logistique au sein de chaque installation et entre les différentes installations. Elles reflètent le fonctionnement journalier des opérations logistiques. Les décisions opérationnelles les plus importantes sont la gestion et le contrôle des stocks, le dimensionnement des lots, l'affectation des stocks aux clients, l'ordonnancement de la production et la définition des programmes de transport et de livraison,

Contrairement aux niveaux tactique et stratégique, peu de travaux, orientés planification multi-sites, ont été développés au niveau opérationnel. Ceci résulte du fait que les décisions opérationnelles sont spécifiques à la configuration du processus de production dans chaque site (flow shop, job shop).

Les décisions effectuées à chacun des trois niveaux de planification (stratégique, tactique, opérationnel) s'imposent comme cadre de la problématique de niveau inférieur. Les données utilisées du premier au troisième niveau sont de moins en moins agrégées et de plus en plus certaines.

Les différents systèmes hiérarchiques de modélisation d'une chaîne logistique (temporelles/fonctionnelles) sont représentés par la Figure 4.3. Pour chaque fonction du réseau, les trois niveaux hiérarchiques de planification (opérationnel, tactique et stratégique) peuvent être définis. Par exemple, pour la fonction transport, la planification stratégique consiste à identifier les modes de transport, la planification tactique s'intéresse au calcul de la taille de la flotte et la planification opérationnelle traite du problème d'affectation des véhicules [Ballou, 1992].

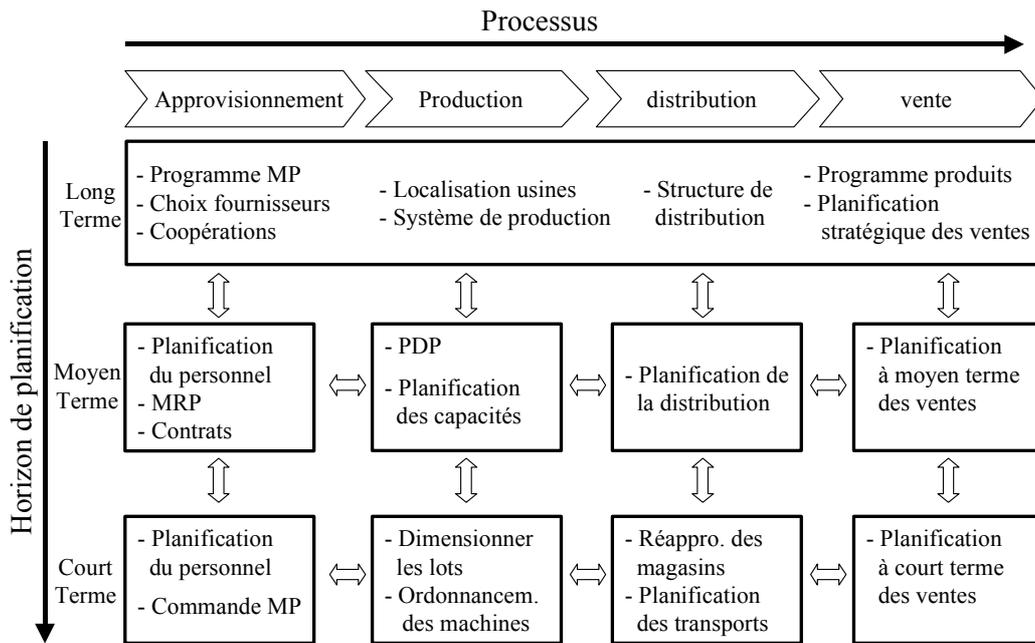


Figure 4.3 – Systèmes hiérarchiques de planification [Stadler, 2000]

## Bilan et positionnement

L'aspect multi-sites n'est considéré que dans les décisions à long terme et à moyen terme. Du fait de la taille des problèmes à résoudre et du niveau de détail des données à traiter, cela est impossible sur un horizon court terme. Par conséquent, nous situons nos travaux dans un contexte de planifications stratégique et tactique de réseaux logistiques.

## 4.5. Problématique de conception et de configuration de chaînes logistiques

### 4.5.1. Conception de chaîne logistique

La structure d'un réseau logistique est décrite à l'aide de nœuds et d'arcs (Figure 4.1). Les nœuds correspondent à des installations (fournisseurs, usines, centres de distribution et clients) et les arcs aux flux de matière. L'optimisation des activités de la chaîne logistique dépend fortement de l'agencement des installations du réseau logistique.

Habituellement, les centres de distribution ne sont pas situés aux mêmes endroits que les sites de production. Des transports doivent donc être organisés entre les différents sites. A partir des centres de distribution, la livraison vers les clients doit être assurée et à partir des fournisseurs, l'approvisionnement des sites de production doit s'organiser. Compte tenu de cette situation, il est nécessaire de déterminer la localisation des diverses installations dans le réseau logistique de manière à minimiser les coûts totaux de la chaîne logistique. Pour atteindre cet objectif, une entreprise de production multi-sites peut par exemple décider de fermer ou transformer certains de ses sites, d'en acquérir de nouveaux ou encore de sélectionner des centres de distribution géographiquement bien répartis. De plus, il est essentiel de préciser la mission de chaque installation retenue. Un tel problème porte le nom de problème de localisation-allocation [Dejax, 2001] ; localisation se référant à la situation géographique et allocation aux activités qui seront

affectées à chacune des installations. Le problème de la capacité, quant à lui, a pour objectif de déterminer la capacité qui devrait être ajoutée ou supprimée à chaque installation pour mieux satisfaire la demande.

Une entreprise de production peut donc décider de travailler avec beaucoup de petites installations ou restreindre leur nombre. La première solution permet de se rapprocher des sources de matières premières ou des clients. La seconde solution limite le coût lié aux infrastructures mais provoque une augmentation des délais de production et de livraison et peut accroître le risque de rupture de stock. Le problème lié au choix d'une de ces deux alternatives peut se formuler sous la forme d'un problème d'optimisation consistant à minimiser la somme des coûts fixes d'infrastructure, des frais de fonctionnement des installations et des dépenses liées aux transports et ce, sous différentes contraintes. Parmi celles-ci, nous retrouvons des contraintes classiques comme le respect des capacités des sites et la satisfaction de la demande, mais également des contraintes plus spécifiques dépendant de l'entreprise, du type de marché concerné, des réglementations nationales et internationales. Les choix liés aux problèmes de localisation et d'allocation sont des décisions stratégiques et tactiques, qui doivent se prendre en tenant compte de l'évolution probable et incertaine de la demande. Si cet élément n'est pas pris en compte, il faudra à terme repenser la localisation et le dimensionnement des installations, conduisant à des coûts supplémentaires et des interruptions d'activités.

Dans un problème de localisation-allocation, nous cherchons donc à répondre aux questions suivantes :

- qui seront les fournisseurs ? quel sera leur nombre ?
- quel fournisseur approvisionnera quel site de production ?
- quels seront le nombre, la localisation et la capacité des installations à ouvrir ?
- quelle sera la mission de chaque site de production et de chaque centre de production ?
- quelle sera la quantité de matières premières nécessaire ?
- quels articles et en quelle quantité produire et stocker chaque article dans chaque installation ?
- quels liens de transport ouvrir ?
- quel moyen de transport utiliser sur chaque lien ?
- quel centre de distribution servira quel client ?

#### **4.5.2. Caractéristiques des modèles d'optimisation**

Cette section porte sur la nature du problème de conception de réseaux logistiques. Nous synthétisons les hypothèses retenues et les principaux éléments pris en compte dans les modèles d'optimisation de la chaîne logistique.

Des travaux abondants existent sur les problèmes de conception de chaîne logistique.

Un premier bilan des principaux modèles de localisation de sites a été présenté par [Aikens, 1985]. En perspective, l'auteur suggère d'étendre ces modèles aux problèmes dynamiques et multi-articles et d'élargir ainsi le champ des contraintes. [Davis, 1993] a exposé une analyse complète de la chaîne logistique globale allant des fournisseurs aux clients en environnement incertain. Les modèles stochastiques développés restent descriptifs et se limitent à l'analyse de chaînes logistiques mono-article. Dans leur première contribution, [Lee et Billington, 1992] ont présenté les différents problèmes associés à la gestion des stocks dans une chaîne logistique. Ensuite, [Lee et Billington, 1993] ont traité le problème de gestion de stocks dans un

environnement incertain. Ils proposent un modèle simple pour évaluer les alternatives de conception de chaînes logistiques. Enfin, ils montrent [Lee et Billington, 1995] comment l'entreprise HP (Hewlett-Packard) a utilisé une approche intégrée pour définir une nouvelle chaîne logistique et améliorer ainsi le niveau de satisfaction client. L'évolution de la modélisation des problèmes de conception de chaînes logistiques a été analysée par [Ballou et Masters, 1993]. Cette analyse montre que la programmation linéaire en nombres entiers (MIP : Mixed Integer Programming) est l'approche la plus utilisée. En effet, les MIP permettent de modéliser un champ très large de contraintes et sont supportés par beaucoup de solvers commerciaux.

[Geoffrion et Powers, 1995] ont retracé l'évolution des modèles de conception de systèmes de distribution stratégique au cours des vingt dernières années et cela depuis leur premier modèle [Geoffrion et Graves, 1974]. Ils ont discuté les différentes définitions de la chaîne logistique, de l'impact d'intégration des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) dans la gestion d'une chaîne logistique et les différentes techniques de modélisation et algorithmes de résolution. Les modèles associés aux problèmes analysés sont souvent complexes et de grande taille. L'application des méthodes de type décomposition de Benders pour la recherche d'une solution optimale est extrêmement difficile. Par conséquent, son implémentation dans des solvers commerciaux est très coûteuse. [Slats *et al.*, 1995] ont dressé un tableau récapitulatif des modèles de conception et de reconception des principales activités logistiques et les méthodes de résolution associées. Les approches utilisées pour la modélisation sont issues de la recherche opérationnelle : programmation mathématique, heuristiques et simulation. [Thomas et Griffin, 1996] ont passé en revue quelques travaux visant à modéliser la coordination et les relations entre deux ou plusieurs fonctions de la chaîne logistique (approvisionnement, production et distribution). Ils ont classé ces modèles en quatre catégories : vendeur/acheteur, production/distribution, stockage/distribution, et la planification stratégique.

Les travaux récents de [Vidal et Goetschalckx, 1998, 2000] retracent en détail les modèles stratégiques de conception de réseaux logistiques. Ils ont synthétisé principalement les modèles à base de MIP. Pour chaque MIP, ils ont montré les différents éléments pris en compte, les méthodes de résolution utilisées et enfin les applications numériques.

Dans toute la bibliographie, les modèles de localisation-allocation de chaîne logistique se distinguent principalement par des caractéristiques exigées par les cas d'application :

### **La nature des objectifs**

L'objectif poursuivi par l'optimisation de réseaux logistiques peut être la minimisation des coûts totaux, la maximisation du profit (avant ou après impôt), la minimisation des délais (le cycle de toute l'activité) ou l'optimisation d'une fonction multi-objectifs.

### **Types de décisions sur l'état des sites**

Dans certains cas, les flux entre les installations sont prédéterminés ; nous avons alors un problème de localisation pure, c'est-à-dire que le problème ne couvre que des choix de sites. Dans d'autres cas, la localisation des installations est prédéterminée et il ne reste qu'à préciser leur mission, c'est-à-dire à déterminer quels articles seront fabriqués dans chaque site de production, qui les approvisionnera en matières, à quelles installations elles livreront leurs articles, quels articles seront stockés dans les centres de distribution ; c'est un problème d'allocation (optimisation des flux). Dans la majorité des cas, ces deux problématiques sont combinées ; nous avons alors un problème de localisation-allocation. Dans certains cas d'implantation de nouveaux réseaux, le problème de localisation de sites peut être continu.

### **Le nombre de périodes de planification**

Si la planification du réseau se fait sur une seule période de l'horizon de planification, nous avons alors un modèle statique (mono-période) et si le réseau est conçu pour un horizon multi-périodes, le modèle est alors dynamique.

### **Le nombre d'articles**

Lorsque les articles à fabriquer et à distribuer sont relativement uniformes, ils peuvent être regroupés dans une famille et considérés comme un seul article dans les modèles d'aide à la décision utilisés, nous avons alors un modèle mono-article. Lorsque les articles n'utilisent pas les mêmes technologies de production, de stockage et de transport, nous avons alors des modèles multi-articles. Les modèles peuvent être également multi-articles si les articles sont définis par leur nomenclature.

### **Le nombre d'échelons dans le réseau logistique**

Le nombre d'échelons d'un réseau logistique est défini comme le nombre de niveaux de centres de distribution entre les sites de production et les clients (centre de distribution, dépôt, magasin). Si la distribution des articles se fait à partir des sites de production, alors le nombre d'échelons est égal à zéro.

### **La nature des contraintes considérées**

Plusieurs contraintes doivent être prises en compte dans les problèmes d'optimisation pour obtenir des solutions réalisables et réalistes de réseaux logistiques. Les plus importantes sur le plan stratégique sont le plus souvent les contraintes de service et la conservation du flux. Ces contraintes interviennent pour s'assurer que la demande de chaque client pourra être satisfaite dans les délais. D'autres contraintes peuvent aussi être rencontrées en pratique : les bornes sur les variables, le dimensionnement des capacités et des stocks, les contraintes financières.

### **La nature des paramètres du modèle**

Les différentes données nécessaires pour concevoir une chaîne logistique (besoins en matières, demandes des articles, délais de transport, taux de change) peuvent être intégrées dans les modèles comme des données déterministes, nous obtenons alors un modèle déterministe. Mais en pratique, l'incertitude et l'imprécision des données rendent ces modèles stochastiques.

### **La nature des capacités dimensionnées**

Sous diverses contraintes, plusieurs types de capacités peuvent être dimensionnées et limitées : la capacité d'approvisionnement des fournisseurs, la capacité de production des sites, la capacité des lignes de production, la capacité de stockage, la capacité de transport, la capacité des centres de distribution.

### **Mono/Multiple sourcing**

Plusieurs politiques d'approvisionnement et de distribution peuvent être définies : un centre de distribution est dédié à un client ; un centre de distribution est dédié à un seul article ; chaque

client demande un seul article ; un fournisseur est dédié à une installation ; un fournisseur est dédié à une seule matière première.

### **La nature des coûts considérés**

Deux types de coûts peuvent caractériser les différentes installations et activités d'un réseau logistique : les coûts fixes et les coûts variables. Les fonctions coûts correspondantes peuvent être linéaires ou non linéaires en fonction des quantités approvisionnées, produites, stockées et/ou transportées. Les coûts non linéaires sont introduits pour modéliser notamment les effets d'échelle : ils peuvent être, selon les auteurs, linéaires, par morceaux, concaves ou convexes, ou quelconques.

### **Les stocks dimensionnés**

Le stock saisonnier d'un article dans chaque site de production et/ou centre de distribution peut être défini par une ou plusieurs composantes suivantes : le stock de rotation en production, les stocks de sécurité, les stocks sur les lignes de transport.

### **La prise en compte des aspects internationaux**

Plusieurs facteurs compliquent le problème de conception d'un réseau logistique dans un contexte de localisation internationale : les tarifs et les droits de douanes, les barrières non-tarifaires, les taux de change, les prix de transfert, les politiques et les réglementations locales.

### **Les méthodes de résolution appliquées**

La plupart des modèles proposés pour la conception de réseaux logistiques sont des programmes linéaires en nombres entiers (MIP). Ces MIP peuvent être résolus par plusieurs méthodes : la décomposition de Benders, les méthodes de factorisation, les méthodes heuristiques, les Solver commerciaux.

### **La complexité des modèles**

La complexité d'un modèle d'optimisation est mesurée par le nombre de variables entières (le plus souvent binaires), le nombre de contraintes et le temps de calcul.

## **4.5.3. Un modèle de référence**

Nous présentons, dans ce paragraphe, un modèle référence d'optimisation de la chaîne logistique développé par [Rota, 1998]. La formulation standard proposée est un programme linéaire en nombres entiers (MIP : Mixed Integer Programming).

### **4.5.3.1. Enoncé du problème**

Dans le cadre de la planification à long terme, la conception de la chaîne logistique consiste à déterminer la localisation et les productions associées à un ensemble d'installations de manière à minimiser le coût total de fonctionnement tout en satisfaisant la demande des clients.

Pour ce faire, nous connaissons :

- les différentes localisations possibles,
- les différents liens possibles entre les installations. Chaque lien est caractérisé par la quantité maximale qui peut être transportée, le coût unitaire de transport d'un article et la durée de transport par article,
- l'ensemble des articles et les nomenclatures des articles finis,
- les demandes prévisionnelles des clients.

Le problème est alors de déterminer combien d'installations ouvrir ou fermer, quelle est la localisation de chaque installation, quels sont les articles fabriqués par chaque installation, et quelles sont les quantités des articles transportées sur chaque lien.

En général, les problèmes sont mis sous la forme de modèles linéaires en nombre entiers. Les variables binaires traduisent les décisions d'ouverture ou de fermeture d'une installation. Les variables continues permettent de modéliser les décisions de production et de distribution.

#### 4.5.3.2. Formulation standard du problème

Avant de donner la formulation standard du problème, nous définissons les variables de décision et les notations utilisées.

Les variables de décision sont relatives à :

- la configuration de la chaîne :

$$\begin{cases} z_{i,f} = 1 & \text{si le produit } i \text{ est fabriqué par l'installation localisée en } f \\ z_{i,f} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- la production : la variable  $X_{i,f,t}$  représente la quantité de l'article  $i$  fabriquée au cours de la période  $t$  par l'installation localisée en  $f$ ,
- la distribution : la variable  $Tr_{i,t,l}$  représente la quantité de l'article  $i$  transportée pendant la période  $t$  sur le lien  $l$ .

La variable d'état  $I_{i,f,t}$ , correspond à la quantité de l'article  $i$  en stock dans l'installation localisée en  $f$  au début de la période  $t$ .

Les notations utilisées sont :

- $F$  : ensemble des localisations possibles,
- $C$  : ensemble des clients,
- $N$  : ensemble des articles, avec  $M \in N$ , ensemble des matières premières,
- $L$  : ensemble des liens,
- $T$  : ensemble des périodes,

- $\phi_{i,f}$  : coût de production d'une unité de l'article  $i$  par l'installation localisée en  $f$ ,
- $ct_{i,l}$  : coût de transport d'une unité de l'article  $i$  sur le lien  $l$ ,
- $cl_f$  : coût fixe de localisation d'une installation en  $f$ ,
- $Capa_{f,t}$  : capacité maximale de production de l'installation localisée en  $f$  pendant la période  $t$ ,
- $StockmaxMP_{i,f,t}$  : stock maximal disponible en matière première  $i$  pour l'installation localisée en  $f$  pendant la période  $t$ ,
- $Transport_{i,l}^{min}$  et  $Transport_{i,l}^{max}$  : quantités minimale et maximale de l'article  $i$  pouvant être transportées sur le lien  $l$ ,
- $NbIns_i^{min}$  et  $NbIns_i^{max}$  : nombre minimum et maximum d'installations ouvertes devant fabriquer l'article  $i$ .

Nous notons  $depuis_f$  l'ensemble des liens dont l'origine est localisée en  $f$  et  $vers_f$  l'ensemble des liens dont la destination est localisée en  $f$ . Enfin,  $D_{i,c,t}$  correspond à la quantité demandée en article  $i$  par le client  $c$  pour la période  $t$  et  $g_{i,j}$  correspond à la quantité de l'article  $i$  nécessaire pour fabriquer une unité de l'article  $j$ .

La formulation du problème est la suivante :

L'objectif est de minimiser la somme des coûts fixes et des coûts variables. La contrainte (1) assure que toute demande exprimée par un client est satisfaite. La contrainte (2) exprime le niveau de stock au début d'une période en fonction du niveau de stock au début de la période précédente et des quantités produites et transportées sur cette période, uniquement pour les articles fabriqués par l'installation localisée en  $f$ . Les matières premières utilisées par l'installation  $f$  sont supposées être en quantité limitée par période (contrainte (5)). La contrainte (3) permet de prendre en compte la nomenclature des articles, avec pour hypothèse qu'une installation ne fabrique jamais à la fois l'article et les sous-articles correspondants. La contrainte (4) limite les quantités fabriquées sur chaque installation. La contrainte (6) indique qu'il existe une quantité minimale et une quantité maximale qu'il est possible de transporter par période sur chaque lien. La contrainte (7) permet de s'assurer que seule une installation ouverte peut produire. Enfin, la contrainte (8) définit un nombre minimum et maximum d'installations ouvertes pour chaque type d'articles.

$$\min \left\{ \sum_{f \in F} [cl_f * \min(1; \sum_{i \in N} z_{i,f})] + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} (\phi_{i,f} \cdot X_{i,f,t} + \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} ct_{i,l} \cdot Tr_{i,t,l}) \right\}$$

sous  $(\forall i \in N, \forall mp \in M, \forall c \in C, \forall t \in T, \forall f \in F)$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \quad \sum_{l \in \text{vers}_c} Tr_{i,t,l} = D_{i,c,t} \\ (2) \quad I_{i,f,t+1} = I_{i,f,t} + X_{i,f,t} + \sum_{l \in \text{vers}_f} Tr_{i,t,l} - \sum_{l \in \text{depuis}_f} Tr_{i,t,l} \\ (3) \quad \sum_{l \in \text{vers}_f} Tr_{i,t,l} = \sum_{j \in N} g_{i,j} \cdot X_{j,f,t} \\ (4) \quad \sum_{i \in N} X_{i,f,t} \leq \text{Capa}_{f,t} \\ (5) \quad I_{mp,f,t} \leq \text{Stock}_{\max} MP_{mp,f,t} \\ (6) \quad \text{Transport}_{i,l}^{\min} \leq Tr_{i,t,l} \leq \text{Transport}_{i,l}^{\max} \\ (7) \quad X_{i,f,t} \leq \text{Capa}_{f,t} \cdot z_{i,f} \\ (8) \quad \text{NbIns}_i^{\min} \leq \sum_{f \in F} z_{i,f} \leq \text{NbIns}_i^{\max} \end{array} \right.$$

Ce problème est linéaire en variables mixtes et peut donc être résolu par un solveur commercial.

#### 4.5.4. Travaux de recherche et principaux modèles d'optimisation

Dans ce qui suit, nous présentons une synthèse des modèles principaux de dimensionnement de réseaux logistiques. Ils ont un point commun avec le modèle référence (4.5.3) qui est de considérer plusieurs installations réparties sur plusieurs zones géographiques. Ils concernent des problématiques différentes de conception de réseaux logistiques suivant les hypothèses retenues et les différentes caractéristiques énoncées précédemment (4.5.2).

[Geoffrion et Graves, 1974]) ont proposé un des premiers modèles de conception de réseaux logistiques multi-articles. Le but principal du modèle est d'optimiser les flux annuels des articles finis. Le réseau modélisé est constitué de trois niveaux de sites : les sites de production, les centres de distribution et les clients. Les sites de production sont supposés à capacités finies et la demande prévisionnelle d'un client est satisfaite à partir d'un seul centre de distribution. Le problème d'optimisation consiste à identifier les centres de distribution à ouvrir, la taille de ces centres de distribution et quels clients chaque centre de distribution doit approvisionner en articles finis. Ce problème est modélisé sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers. La fonction objectif à minimiser regroupe les différents coûts fixes et variables des sites de production, des centres de distribution et le transport. Les contraintes regroupent les capacités disponibles dans chaque site de production, la satisfaction de la demande de chaque client, la livraison d'un article à un client à partir d'un seul centre de distribution, les bornes inférieure et supérieure de consommation dans les centres de distribution et enfin les contraintes linéaires de configuration du système de distribution. [Geoffrion *et al.*, 1978] ont proposé ensuite une extension de ce modèle en considérant une deuxième fonction objectif pour maximiser le profit. Le même modèle est décrit dans [Geoffrion *et al.*, 1982] mais est non linéaire en raison de présence de contraintes non linéaires de consommation de matières dans les sites de production. Enfin, plusieurs applications industrielles et numériques de ces modèles ont été discutées dans [Geoffrion et Powers, 1993].

La contribution majeure de ces travaux réside essentiellement dans la résolution du modèle. Les auteurs proposent une variante de la méthode de décomposition de Benders [Benders, 1962]. Elle consiste à fixer temporairement les variables binaires. Le modèle résultant est ainsi un ensemble de programmes linéaires. Chaque programme linéaire correspond à un problème classique de transport de chaque article. Ce processus est itératif et à chaque itération, deux bornes, inférieure et supérieure, sont calculées. Le test d'arrêt de la méthode est calculé par la différence entre la borne inférieure et supérieure qui doit être inférieure ou égale à une valeur spécifique (fixée). La Figure 4.4 résume cette méthode.

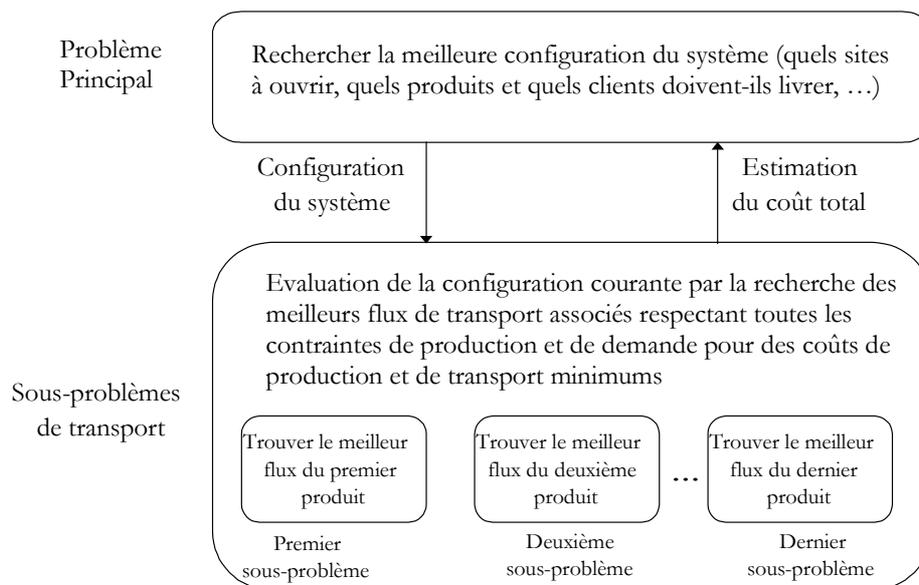


Figure 4.4 – Variante de la décomposition de Benders [Geoffrion et Powers, 1993]

Cette approche de décomposition a beaucoup d'avantages. Elle n'est pas sensible au nombre d'articles utilisés dans le modèle (le nombre d'itérations est indépendant du nombre d'articles). En conclusion, le temps de calcul est linéaire par rapport au nombre d'articles utilisés. Cette méthode permet également l'utilisation des approches les plus utilisées et les plus efficaces pour la résolution des problèmes classiques de transport mono-article.

Pour définir le problème de localisation de sites de production à capacités finies, [Van Roy, 1983, 1986] a proposé une extension du premier modèle de [Geoffrion et Graves, 1974]. Pour la résolution, il a développé une méthode de décomposition hybride regroupant la décomposition primale de Benders et la décomposition duale de type relaxation Lagrangienne. L'auteur a étudié un cas industriel d'une entreprise de liquéfaction de gaz qui commercialise deux articles, le propane et le butane. La configuration de l'entreprise est recherchée sur un ensemble de deux raffineries (fournisseurs), dix usines de remplissage des bouteilles (sites de production), quarante dépôts (centres de distribution) et deux cents clients.

Sur la base du premier modèle de [Geoffrion et Graves, 1974], [Cohen et Lee, 1985] ont développé le modèle "PILOT" de conception de réseaux production/distribution multi-articles. Le réseau modélisé se décompose en quatre niveaux : les fournisseurs, les sites de production, les centres de distribution et enfin les clients. C'est un programme mathématique déterministe et dynamique. L'objectif de ce modèle est de minimiser une fonction coût non linéaire. Les variables de décisions utilisées définissent les décisions d'ouverture ou de fermeture d'un site de production ou d'un centre de distribution, les flux intermédiaires des articles et la disponibilité des matières premières. Pour la résolution, les auteurs proposent une heuristique.

Le caractère international du problème de localisation de sites a été introduit par [Hodder et Dincer, 1986]. La formulation du modèle prend en compte les fluctuations des taux de change, les prix des marchés et les coûts fixes stochastiques. Il est considéré comme un des premiers modèles qui tiennent compte des aspects financiers dans la localisation des sites. La fonction objectif maximise la différence entre le profit après taxes et la variance du profit pondérée avec un facteur d'aversion au risque. Les contraintes regroupent les limitations des capacités de production, les bornes supérieures de la demande, les contraintes financières et des bornes sur les variables de décision. Le modèle résultant est un MIP non linéaire complexe et large. Pour réduire la complexité du modèle, les auteurs ont utilisé plusieurs approximations.

[Brown *et al.*, 1987] ont développé un modèle MIP multi-articles qui permet de prendre des décisions d'ouverture ou de fermeture d'un site, d'affectation des articles et d'équipements aux différents sites de production. La fonction objectif est une combinaison de coûts variables et fixes de production et de transport sous les contraintes de satisfaction des demandes clients, de conservation des flux de matières et des capacités de production des sites et des équipements. Pour résoudre le modèle, les auteurs ont proposé une méthode de décomposition. Des contraintes supplémentaires (coupes) sont rajoutées au modèle pour converger vers une meilleure solution avec moins d'itérations. Ces contraintes peuvent être violées. En effet, à chaque fois qu'une contrainte est violée, une pénalité, calculée sur la base d'un coût, est rajoutée à la valeur finale de la fonction objectif.

Le modèle MIP de [Cohen et Lee, 1989], pour la conception de réseau global et international de production/distribution, maximise la valeur ajoutée de la chaîne avant et après taxes. Pour résoudre ce problème avec un logiciel de programmation linéaire (GAMS/MINOS), le modèle MIP est transformé en un programme linéaire par instanciation des variables binaires. Notons que ce modèle est développé pour planifier la structure du réseau sur une seule période de l'horizon. La planification sur tout l'horizon (multi-périodes) nécessite des exécutions successives du modèle. Pour illustrer le modèle, un exemple issu d'une application industrielle de fabrication d'ordinateurs est présenté. Il contient environ 1 500 variables continues et 3 000 contraintes.

Les problèmes de mesure de taux de service et de flexibilité des installations d'un réseau logistique ont été traités par [Cohen et Lee, 1988]. La méthodologie proposée s'appuie sur la définition des relations existantes entre les différentes politiques de production et de distribution ayant un impact considérable sur le niveau des stocks et sur l'ordonnancement. Pour cela, un ensemble de sous-modèles hiérarchiques et stochastiques est proposé. Cette forme de modélisation offre la possibilité d'optimiser chaque sous modèle et ses dépendances avec les autres. Mais dans l'ensemble, le modèle est très rigide et il reste difficile à résoudre de manière globale jusqu'à l'optimalité. Pour cette raison, les auteurs introduisent un ensemble d'heuristiques. Notons que ces sous modèles ne traitent pas des problèmes de localisation de sites et de planification des capacités. En effet, ces éléments sont considérés comme des données. En conclusion, les auteurs soulignent l'importance des facteurs qualitatifs et incertains qu'il faut prendre en compte pour analyser la sensibilité des modèles. Ils notent également qu'il n'y a pas de formalisme consistant pour modéliser les contraintes de nomenclature. Suite à ces modèles, [Cohen et Kleindorfer, 1993] ont proposé une extension. Ils ont développé un programme stochastique multi-périodes (dynamique) qui interagit avec un ensemble de sous-modèles : un modèle stochastique pour la configuration du réseau logistique, un modèle pour dimensionner les flux financiers et un modèle stochastique des taux de change. Notons que la formulation mathématique n'a pas été développée.

Un modèle multi-articles de coordination des fonctions approvisionnement, production et distribution d'une chaîne logistique est présenté par [Cohen *et al.*, 1989]. Le réseau, défini comme une firme multinationale et globale, est modélisé en trois niveaux : les fournisseurs, les sites de production et les marchés. La fonction objectif maximise le profit après taxes sous les contraintes d'approvisionnement en matières premières, de transport et de satisfaction de la demande des

clients. Les stocks des articles finis sont supposés nuls à la fin de chaque période et par conséquent, les coûts de stockage ne sont pris en compte dans la fonction objectif. Le modèle traite principalement des facteurs qui se rapportent à des réseaux internationaux (économies d'échelle, taux de change, taxes et charges douanières), et à la spécificité de chaque pays (règles locales d'approvisionnement). Il est stochastique et il traite particulièrement les fluctuations aléatoires des taux de change et l'incertitude sur les prix des marchés. Le modèle final (un MIP dynamique) est non linéaire du fait de présence de contraintes financières non linéaires. Son originalité réside dans l'introduction des données relatives aux contrats fournisseurs. En effet, pour une période donnée, un ou plusieurs contrats peuvent être signés avec un fournisseur. Un contrat est défini par une durée, un coût fixe et des coûts unitaires d'achat et de transport des articles contenus dans le contrat. Pour la résolution du modèle, les auteurs proposent une heuristique mais aucun résultat numérique n'est développé.

[Goetschalckx *et al.*, 1994] ont développé un modèle global pour traiter le problème de conception et de localisation des réseaux logistiques. C'est un modèle multi-articles, multi-échelons, multi-lignes de transport, déterministe et statique. Un article est défini par une nomenclature à un seul niveau. Chaque site de production est identifié par une localisation et une capacité maximale de production. Un centre de distribution est caractérisé par une localisation et une capacité maximale de stockage identifiée par le dimensionnement des stocks de sécurité. Les liens de transport entre les différents nœuds sont assurés par un ou plusieurs modes de transport et une capacité limite de transport sur chaque mode. Pour résoudre ce MIP complexe, les auteurs ont développé un environnement "CIMPEL" qui offre à l'utilisateur une interface graphique. CIMPEL est composé d'une bibliothèque d'heuristiques, d'un module d'optimisation et d'un ensemble d'algorithmes d'analyse de sensibilité et de simulation. La méthode proposée se décompose en plusieurs phases. Une première phase permet de simplifier et de reformuler le problème par l'identification des éléments redondants, l'affectation de valeurs fixes à certaines variables et l'amélioration des bornes inférieures et supérieures de certaines variables. La deuxième phase consiste à définir des règles de séparation et de branchement des variables binaires par l'utilisation d'un ensemble d'heuristiques. La solution obtenue par le module d'optimisation est ensuite introduite dans la base du projet et elle est utilisée par CIMPEL. A chaque itération, une borne supérieure de la solution optimale est calculée par une heuristique basée sur la programmation linéaire. Pour cela, le modèle est transformé en un programme linéaire (PL) par la relaxation (fixer les variables binaires). Le PL est ensuite résolu. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus, dans la solution, de variables binaires avec des valeurs réelles. Pour accélérer la recherche de la solution optimale, des coupes sont rajoutées au modèle initial.

La thèse de [Thierry, 1994] a porté sur la planification et l'ordonnancement multi-sites en utilisant une approche par satisfaction de contraintes. [Thierry *et al.*, 1993] ont développé un modèle dynamique basé sur la théorie des flots pour des problèmes multi-sites et multi-articles. Pour le résoudre, il a été reformulé en un modèle CSP. Pour réduire la complexité du problème, ils proposent une méthode de réduction basée sur la notion d'articles et de processus critiques.

[Bel *et al.*, 1996] ont mené une étude pour Renault qui consistait à déterminer les localisations des unités de production flexibles de manière à satisfaire la demande de plusieurs types de véhicules (une dizaine) dans différentes zones géographiques (42 localisations). Cette étude a débouché sur la proposition d'un MIP. Pour cette application, le MIP comprenait plus de 17 000 variables dont 462 entières. La résolution de ce MIP permet d'obtenir les réseaux production/distribution minimisant la somme des coûts de production et de distribution pour une répartition donnée de la demande. Une extension de ce travail a consisté à rechercher une solution qui soit robuste à des variations de la demande [Rota, 1995]. Le modèle résultant est multicritère et est résolu par l'utilisation des algorithmes génétiques.

Pour optimiser un système de production/distribution stratégique, [Cole, 1995] a développé un modèle MIP multi-articles, statique et multi-échelons. Il a introduit le taux de service de chaque client. C'est un paramètre défini en fonction d'un coefficient calculé par le rapport entre la demande déterministe du client et les capacités de livraison en termes de délai et de distance. Ces taux de services sont pris en compte dans le dimensionnement des stocks de sécurité. Pour pouvoir utiliser le solveur commercial Ilog Cplex, toutes les contraintes non linéaires sont linéarisées. L'exemple étudié est un MIP à 2 297 contraintes, 2 907 variables dont 887 binaires. Une fois le MIP résolu, plusieurs simulations sont utilisées pour vérifier la sensibilité du modèle à la variation de certains paramètres.

Pour optimiser la chaîne logistique globale de DEC (Digital Equipment Corporation), [Arntzen *et al.*, 1995] ont développé un modèle de la chaîne logistique globale (GSCM : Global Supply Chain Model). Il est sans doute l'un des modèles les plus complets. Son but principal était de comparer différentes stratégies de reconception des réseaux de production et de distribution existants de DEC. Le GSCM est un programme linéaire en nombres entiers dynamique et multi-articles. C'est un modèle qui permet de réaliser un équilibre entre les paramètres coût, délai et capacité. En effet, la fonction objectif, à minimiser, est une combinaison linéaire d'un coût et d'un délai. Le coût total de la chaîne regroupe les coûts variables de production, de stockage et de transport, et les coûts fixes de production (ouverture de sites et de technologies de production). Le délai total de l'activité de la chaîne regroupe les délais de production et les délais de transport. Notons que dans leur contribution, les auteurs n'ont pas expliqué comment les deux termes, coût et délai (avec deux unités de mesure différentes), doivent être gérés dans la fonction objectif. L'intérêt principal de ce modèle est de prendre en compte les coûts dus aux droits de douanes (taxes à l'importation) et les effets des communautés commerciales (EU<sup>2</sup>, NAFTA<sup>3</sup>) sur le fonctionnement et le coût de la chaîne. Ce modèle permet également de modéliser la nomenclature globale de chaque article. Le problème, mis sous la forme d'un MIP, comprend 2 000 à 6 000 contraintes et entre 5 000 à 20 000 variables dont seulement une centaine est binaire. Son optimisation a permis à DEC de réduire le nombre de sites de production de 33 usines à 12 usines et le nombre de centres de distribution de 34 à 17.

[Verter et Dincer, 1995] ont décrit un problème de conception des systèmes production/distribution. Ils proposent un modèle de localisation des sites de filiales multinationales et de planification de la capacité. En effet, les avantages principaux d'une configuration globale et internationale des activités sont d'accéder à une main-d'œuvre bas coût, à des matières premières moins chères, à des opportunités d'ordre financier et à des marchés plus larges et plus diversifiés. Le réseau défini est multi-échelons (centres de distribution, magasins, clients) et multi-articles (bénéficiaire des économies d'échelle). Les auteurs insistent sur la nature stochastique du problème de localisation internationale du fait de l'évolution aléatoire des prix de marchés et des taux de change.

Pour les mêmes motivations, [Vidal et Goetschalckx, 1996] ont modélisé les impacts des fluctuations des taux de change et de la fiabilité des fournisseurs sur la configuration du système logistique. Ils ont alors développé un modèle MIP et ont étudié la sensibilité de la chaîne globale à ces facteurs aléatoires. La fiabilité d'un fournisseur est exprimée par une probabilité que ce fournisseur approvisionne chaque site de production dans les délais. Cette probabilité est limitée par une valeur spécifique. Une révision et une extension de ce modèle stochastique sont proposées dans [Vidal et Goetschalckx, 2000] avec un exemple d'application numérique. Le réseau générique est constitué de 20 fournisseurs, 10 usines, 80 clients, 3 modes par lien de transport, 20 matières premières et 10 articles finis. Ce problème, mis sous la forme d'un MIP, comprend 6 520 variables (dont 435 binaires) et 6 363 contraintes et résolu avec Ilog Cplex. Les auteurs ont présenté une analyse de sensibilité du coût de la solution aux fluctuations des taux de

---

<sup>2</sup> EU : Union Européenne

<sup>3</sup> NAFTA : North American Free Trade Agreement

change, aux variations de la demande, à la fiabilité des fournisseurs et aux délais de transport et de production.

[Dogan et Goetschalckx, 1999] ont étudié un problème de conception de réseau logistique aux niveaux stratégique et tactique. Ils proposent une formulation par un programme linéaire en nombres entiers et une méthode de résolution basée sur la décomposition primale de Benders. Ils ont introduit le choix de lignes de production. Ces lignes se distinguent selon leur technologie et/ou leur capacité de production. Le modèle est décomposé en deux sous-modèles, un modèle de localisation de sites, de dimensionnement des ressources et d'affectation des productions (résolu par le module MIP de Cplex), et un modèle de dimensionnement des flux de transport (résolu par le module PL de Cplex). Les auteurs ont étudié deux applications numériques correspondant aux deux cas : statique (une saison) et dynamique (trois saisons couvrant un horizon d'une année).

[Goetschalckx, 2000] souligne l'importance de la reconception de chaînes logistiques pour s'adapter à l'évolution des marchés. Le but principal est alors de redimensionner la configuration de la chaîne logistique par la fermeture ou l'ouverture de sites. Il a présenté une formulation verbale du problème de conception stratégique du réseau (GSCF : Global Supply Chain Formulation).

[Goetschalckx *et al.*, 2001] ont constaté que les méthodes les plus couramment utilisées pour résoudre les problèmes de conception de réseaux logistiques sont l'analyse de la sensibilité et l'analyse à base de scénarios. Ces méthodes ne permettent pas de prendre en compte, de manière systématique, les interactions entre les différents paramètres stochastiques. A partir de ce constat, ils proposent une méthode de décomposition stochastique. La résolution est basée sur des méthodes de simulation des programmes stochastiques et des méthodes de résolution des problèmes déterministes. Cette méthode génère plusieurs configurations réalisables de la chaîne logistique. Ensuite, plusieurs sous-modèles déterministes sont résolus pour chaque configuration. Une moyenne et un écart type du coût de chaque configuration sont calculés. Enfin, la solution optimale correspond à la configuration ayant la meilleure combinaison linéaire de la moyenne et de l'écart type. Dans leur contribution, les auteurs introduisent la notion de configuration flexible de réseau pour laquelle le coût total de fonctionnement ne varie pas considérablement quand certains paramètres varient (capacité de production, demande des clients, etc.). Une configuration robuste du réseau correspond à toute configuration pour laquelle la valeur de la fonction objectif varie de très peu quand les paramètres coûts varient. Les auteurs résument les résultats de trois exemples numériques : un exemple de petite taille, un exemple de taille moyenne et un exemple issu d'un cas industriel (grande taille).

Pour la définition d'un réseau logistique, [Lucas *et al.*, 1999] ont analysé les effets de l'incertain sur les décisions de planification stratégique et tactique. Ils ont d'abord proposé un modèle MIP déterministe pour la conception d'un réseau logistique. Ensuite, sur la base de ce modèle, un autre modèle est développé pour évaluer les effets de l'incertain sur la configuration du réseau. L'incertitude porte sur plusieurs éléments (Figure 4.5) : les stocks des articles, les délais de transport, la demande des clients, le taux de rendement des installations de production, les facteurs économiques et politiques des pays.

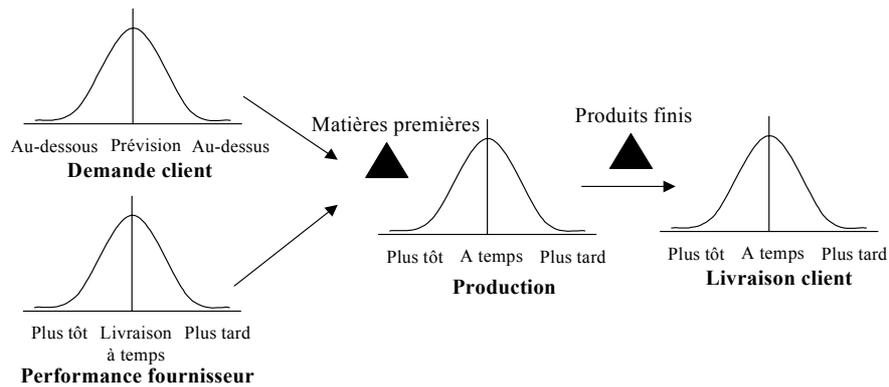


Figure 4.5 – Eléments incertains d’une chaîne logistique

Pour résoudre le modèle stochastique, les auteurs ont développé une approche d’optimisation par identification d’un ensemble de stratégies "sous-optimales" (scénarios). Un scénario correspond à une réalisation de tous les paramètres incertains. L’approche de résolution proposée se décompose en deux étapes et elle est illustrée par la Figure 4.6 :

1. recherche d’une configuration optimale pour chaque scénario, et
2. évaluation de toutes les configurations avec tous les scénarios.

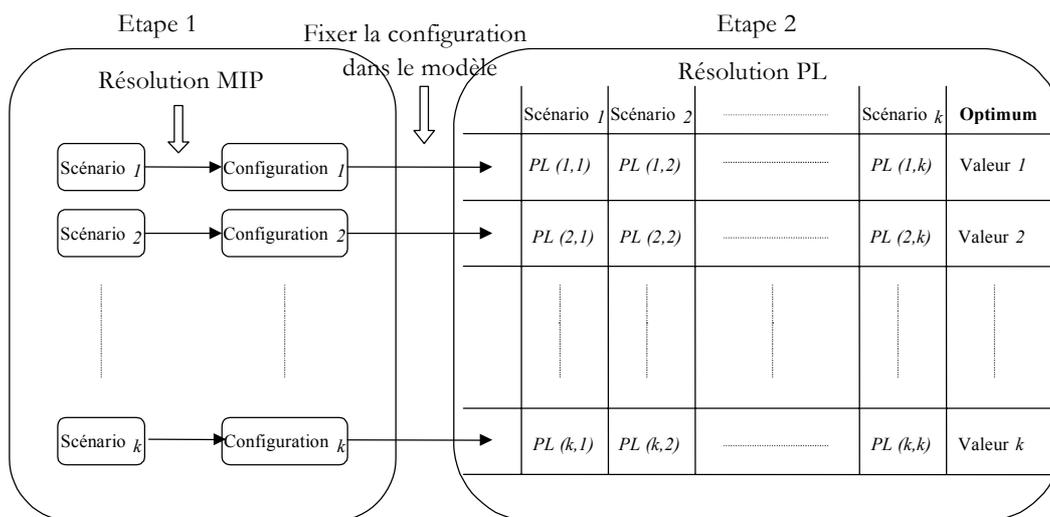


Figure 4.6 – Méthode de résolution à base de scénarios

[Martel, 2001] [Martel *et al.*, 2001] ont présenté un modèle général qui permet d’optimiser la structure d’un réseau logistique, de configurer les installations et de préciser leur mission. Il propose une approche pour modéliser les technologies de production, de stockage et de réception-livraison des installations. Ce modèle tient compte des nomenclatures des articles et des économies d’échelle. Pour résoudre ce modèle d’optimisation, ils proposent de comparer les performances du solver Cplex avec celles d’un algorithme basé sur la décomposition de Benders. Pour accélérer la méthode de Benders, ils ont ajouté des coupes au modèle obtenu en appliquant l’approche de Benders. Ils concluent sur le fait que la formulation du problème a un impact considérable sur les temps de calcul et qu’il est préférable de chercher des coupes efficaces. Dans [Martel et Vankatadri, 1999], ils ont modélisé des problématiques d’expansion de la capacité par type de technologie lorsque des économies d’échelle sont possibles.

## 4.6. Bilan et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons replacé le rôle et le cadre des modèles de conception et de configuration de réseaux logistiques dans le cadre de la planification stratégique et tactique.

Nous avons d'abord présenté la problématique de planification stratégique et de décisions stratégiques de conception de chaîne logistique. Pour illustrer ce type de problème, un modèle standard de conception de réseau a été présenté en détaillant sa formulation mathématique. Ensuite, nous avons synthétisé un ensemble de caractéristiques pouvant décrire un modèle de conception de chaîne logistique et les hypothèses retenues dans chaque contexte. Enfin, un état de l'art sur les principaux modèles d'optimisation a été dressé.

Toutefois, les problématiques traitées par ces modèles supposent que la structure des articles soit figée et que le redimensionnement du réseau logistique ne remet en aucun cas en cause la conception des produits. Or, pour notre cas, la structure du produit n'est pas figée. Nous proposons alors un modèle permettant de sélectionner les solutions produits à partir d'une nomenclature générique et de dimensionner la chaîne logistique en exploitant un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers.

Par référence au modèle standard, nous synthétisons dans le Tableau 4.1 l'état de l'art en montrant les éléments pris en compte dans la formulation des principaux modèles de conception de chaînes logistiques.

La dernière colonne du tableau récapitulatif correspond à notre problématique et aux caractéristiques du modèle de conception de réseau logistique que nous développons dans le cadre du chapitre suivant. Nous justifierons ainsi chacune des caractéristiques évoquées.

<b>Caractéristiques des modèles</b>	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]
<b>État des sites</b>													
Allocation (optimisation des flux)					X						X	X	
Localisation discrète et ou allocation	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Localisation continue													
<b>Horizon de planification</b>													
Statique		X	X	X	X		X		X	X	X		
Dynamique	X					X		X			X	X	X
<b>Le nombre de produits</b>													
Mono-produit													
Multi-produits	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Le nombre d'échelons (prod. vers distrib.)</b>	0	1	1	0	1	0	n	/	2	0	/	n	n
<b>La fonction objectif</b>													
Minimisation des coûts	X	X	X	X			X		X		X	X	X
Maximisation des profits			X		X	X				X			
Fonction Multicritère								X					
<b>Contraintes supplémentaires</b>													
Contraintes de nomenclature	X				X	X	X	X		X		X	X
Bornes sur les variables	X	X	X	X			X			X	X	X	
Coupes				X			X					X	
<b>Capacités</b>													
Capacité des sites de production	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Capacité des fournisseurs					X	X				X	X	X	
Capacité des liens de transport	X						X		X	X	X		
Capacité des centres de distribution		X	X				X	X	X		X	X	X
Capacité des lignes de production							X				X	X	X
<b>Single sourcing</b>													
Un client livré depuis un seul centre de distribution		X					X				X		
Un produit n'est que dans un centre de distribution									X		X		
Un seul fournisseur approvisionne une usine											X		
<b>Coûts non linéaires</b>													
Coûts des centres de distribution		X	X						X				
Coûts de production													
Coûts de transport													
Coûts d'approvisionnement													
<b>Stocks dimensionnés</b>													
Stocks sur les lignes de transport			X				X	X	X		X		X
Stocks cycliques	X						X	X	X	X	X	X	X
Stocks de sécurité							X	X	X	X	X	X	X
<b>Service client</b>													
Satisfaction de la demande	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Délai (distance) maximum de livraison		X					X		X		X		
Taux de service									X				
<b>Paramètres stochastiques</b>													
Taux de change						X				X			
Demande									X	X	X		
Fiabilité des fournisseurs										X			
<b>Aspects internationaux</b>													
Taxes et charges douanières					X	X		X					
Taux de change						X				X			
Reglementations locales						X		X					
<b>Méthodes de résolution</b>													
Décomposition de Benders (ou une variante)		X	X								X	X	
Méthode de décomposition				X									
Programme linéaire (variables binaires fixées)					X		X						
Heuristique						X	X						
Méthode de factorisation								X					
Solver commercial							X		X	X	X	X	X
<b>La complexité des modèles</b>													
Nombre maximum de variables 0-1	/	513	/	/	/	/	1122	100	887	435	102	168	559
Nombre maximum de contraintes	/	8441	/	19841	3000	/	27441	6000	2297	6363	1000	233	30849
Temps CPU	/	191	1800	64	/	/	10740	60	593	/	154	22	744,77

[1] Le Modèle standard : Rota, (1998) – [2] Geoffrion et Graves, (1974) – [3] Geoffrion *et al.*, (1978) – [4] Brown *et al.*, (1987)  
 [5] Cohen et Lee, (1989) – [6] Cohen *et al.*, (1989) – [7] Goetschalckx *et al.*, (1994) – [8] Arntzen *et al.*, (1995) – [9] Cole, (1995)  
 [10] Vidal et Goetschalckx, (1996) – [11] Dogan et Goetschalckx, (1999) – [12] Martel *et al.*, (2001) – [13] Hadj-Hamou *et al.*, (2002)

Tableau 4.1 – Tableau récapitulatif des modèles de conception de chaîne logistique



# Chapitre 5. Un modèle de conception de chaîne logistique avec nomenclature *ET/OU*

## 5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle qui permet d'optimiser la structure de la chaîne logistique, de configurer les installations du réseau et de spécifier leurs activités. En parallèle, le modèle d'optimisation permet d'évaluer les solutions de conception de produit par la recherche de la meilleure instance de la nomenclature générique. Nous proposons, à notre connaissance, une nouvelle approche pour modéliser la nomenclature générique des articles, les ressources de production et le dimensionnement des stocks. C'est un modèle de planification stratégique de réseaux multi-sites de production et de distribution. Il est dynamique (multi-périodes de planification), multi-articules et déterministe.

Dans la section (5.2), nous exposons les différentes composantes et hypothèses du modèle. Pour cela, nous caractérisons la nomenclature générique du produit en spécifiant les types d'articles et de liens identifiés. Ensuite, nous présentons des hypothèses sur la structure générique du réseau logistique.

La seconde section (5.3) est dédiée à la définition du problème d'optimisation que nous traitons. Les différentes notations que nous utilisons dans la formulation mathématique sont résumées dans la section suivante (5.4).

La formulation mathématique du modèle par un programme linéaire en nombres entiers est détaillée dans la section (5.5). Le programme minimise le coût total de fonctionnement du réseau sous diverses contraintes.

## 5.2. Composantes et hypothèses du modèle

### 5.2.1. Nomenclature générique des articles

Dans un problème de planification, le rôle d'une nomenclature est de permettre l'expression des quantités à planifier d'un article étant donné sa demande et les quantités planifiées en articles de niveaux supérieurs.

La nomenclature générique définie au Chapitre 3 (Figure 5.1) fait apparaître deux types d'articles :

- des articles logiques (*Demande, Segment, Pack*) qui ne sont jamais fabriqués, stockés ni transportés,
- des articles physiques (*BOM, Mod*) qui peuvent être fabriqués, stockés et transportés.

Les liens de nomenclatures identifiés entre ces articles au Chapitre 3 sont :

- Article logique (ET) → Article logique : *Demande* (ET) → *Segment\_i*.
- Article logique (OU) → Article logique : *Segment\_i* (OU) → *Pack\_i*.
- Article logique (OU) → Article physique : *Pack\_i* (OU) → *BOM*.
- Article physique (ET) → Article physique : *BOM* (ET) → *Mod*.

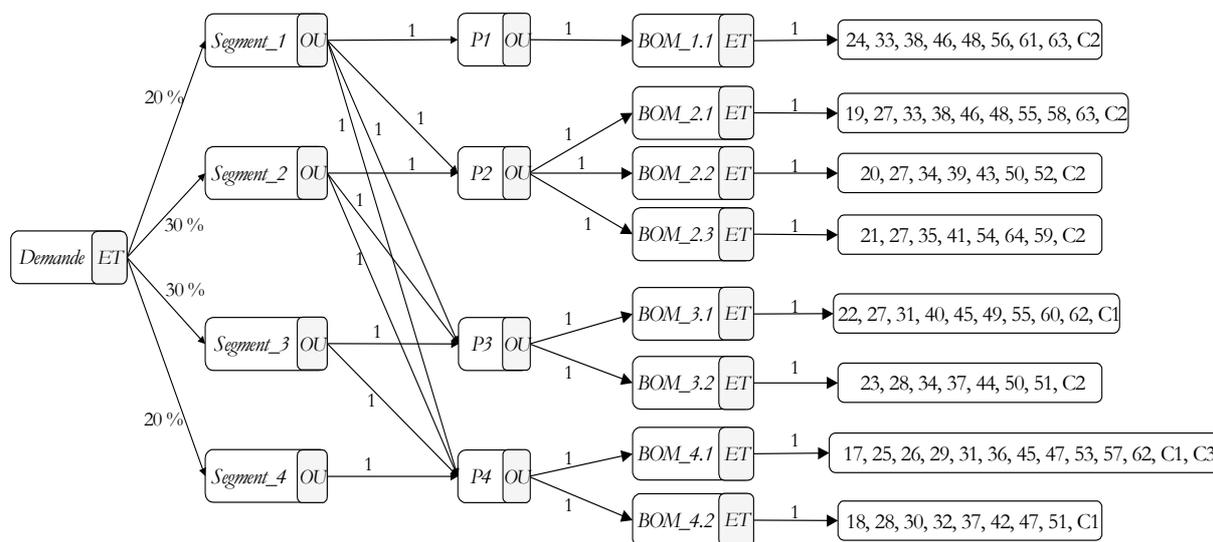


Figure 5.1 – Nomenclature générique des articles

Nous représentons sur le Tableau 5.1 les différentes possibilités de liens de nomenclature suivant que les articles composés/composants soient physiques ou logiques et suivant que le composé soit en "ET" ou en "OU".

Lien composé/composant		Composant Physique	Composant Logique
Composé en "ET"	Physique	<i>BOM</i> (ET) → <i>Mod</i> (1)	(5)
	Logique	(2)	<i>Demande</i> (ET) → <i>Segment_i</i> (6)
Composé en "OU"	Physique	(3)	(7)
	Logique	<i>Pack_i</i> (OU) → <i>BOM</i> (4)	<i>Segment_i</i> (OU) → <i>Pack_i</i> (8)

Tableau 5.1 – Exemple de signification de lien composé → composant dans la nomenclature générique

Comme le montre le Tableau 5.1, la nomenclature générique apporte de nombreuses possibilités (huit cas) pour modéliser les différents liens composé/composant. Les liens de la nomenclature générique identifiés au Chapitre 3 couvrent uniquement quatre cas : (1) *BOM* (ET) → *Mod*, (4) *Pack\_i* (OU) → *BOM*, (6) *Demande* (ET) → *Segment\_i* et (8) *Segment\_i* (OU) → *Pack\_i*.

Mais nous pouvons imaginer vouloir représenter les extensions suivantes :

- Article physique (OU) → Article physique (3) :  
Un module *Mod* peut être obtenu à partir de deux matières premières, l'une de ces matières premières *Mat* doit être sélectionnée. Nous obtenons ainsi le lien *Mod* (OU) → *Mat* qui correspond à la case (3).
- Article physique (ET) → Article logique (5) :  
Une nomenclature *BOM* composée de plusieurs modules *Mod* et pour un de ces modules, il existe deux variantes *Mod\_1* et *Mod\_2*. Nous voulons représenter dans ce cas du "ET" et du "OU" dans la composition de l'article *BOM*. Cela nécessite un article logique intermédiaire entre *BOM* et *Mod\_1/Mod\_2* : *BOM* (ET) → *Article\_Logique* (OU) → *Mod\_1/Mod\_2* qui correspond à une combinaison des cases (5) et (4).
- Article logique (ET) → Article physique (2) :  
Un client peut demander une nomenclature *BOM* non assemblée, donc un ensemble de modules *Mod*. Cet ensemble de modules est considéré comme un article logique, appelé souvent article fantôme en gestion de production. Dans ce cas, nous considérons l'article *BOM* comme un article logique, d'où la case (2) qui représente le lien *BOM\_Logique* (ET) → *Mod*.
- Article physique (OU) → Article logique :  
Pour ce cas (case 7), nous n'avons pas trouvé de situation réelle correspondante.

Dans un but de généralité, toutes les possibilités de liens de nomenclature sont prises en compte dans notre modèle.

Notons que les modèles de conception de réseau logistique ayant intégré la notion de nomenclature arborescente [Arntzen *et al.*, 1995] [Martel, 2001] ne couvrent que les articles physiques de type "ET" (case 1 du Tableau 5.1).

Nous considérons par la suite dans le modèle la terminologie suivante :

- des articles physiques ou des articles logiques,
- des liens de nomenclature générique composé/composant ou père/fils,
- des composés de type "ET" ou de type "OU".

### 5.2.2. Hypothèses sur la structure générique du réseau

Nous considérons un réseau logistique générique pour la production, le stockage et la distribution des articles, comme celui qui est illustré par la Figure 5.2. Ce réseau est composé d'un ensemble de nœuds qui représentent des installations qui peuvent fabriquer des articles intermédiaires et des articles finis et qui peuvent servir également de centres de stockage et de distribution. Un ensemble de fournisseurs approvisionne ces installations en matières premières et en composants. A partir de ces installations, les articles sont acheminés vers des nœuds de demande (les clients).

C'est un réseau multi-sites de production et de distribution. Une installation potentielle peut être dédiée soit à la production, soit à la distribution ou aux deux activités. Différents liens peuvent exister entre les installations. Il en résulte un réseau multi-échelons [Goetschalckx *et al.*, 1994].

Considérant la saisonnalité des demandes d'articles exprimées par chaque client, nous définissons la structure du réseau logistique sur un horizon de planification sur plusieurs années subdivisé en plusieurs saisons (périodes), d'où un modèle dynamique.

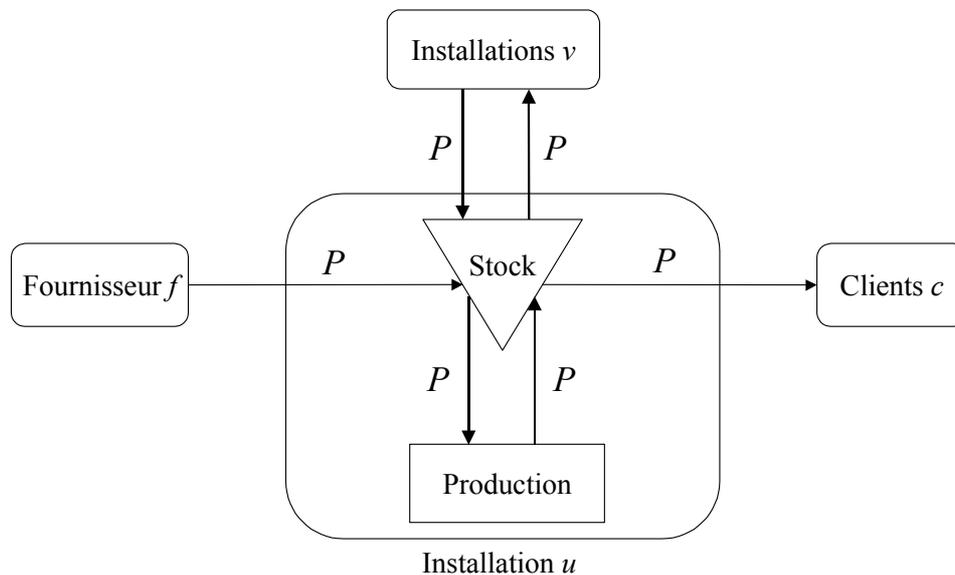


Figure 5.2 – Configuration générique du réseau logistique

### 5.2.2.1. Les installations du réseau

Les nœuds du réseau correspondent à des installations existantes, ayant déjà une activité de production, de stockage et/ou de distribution, et éventuellement des installations où il serait possible d'y installer une activité, mais la configuration du réseau et la fonction de chaque installation sont des décisions à prendre. Les installations sont réparties à travers le monde. Les taux de change, les taxes et les contraintes douanières ne sont pas pris en compte dans notre modèle.

Par cette structure générique, nous ne séparons pas les différents sous-réseaux de la chaîne logistique (approvisionnement, production, distribution). Nous représentons tous les nœuds du réseau comme des installations génériques pouvant abriter une ou plusieurs activités d'approvisionnement, de production et de distribution.

Ainsi, une installation dédiée seulement à la production n'assure pas l'activité de livraison d'articles aux clients. Elle a des liens uniquement avec d'autres installations. À l'opposé, un centre de distribution n'assure pas l'activité de production. Enfin, un fournisseur est considéré comme une installation n'ayant pas d'activité de production. À ces installations fournisseurs, nous n'imposons pas de contraintes de conservation de flux. Nous supposons leurs capacités infinies.

À une décision d'ouverture ou de fermeture d'une installation, nous associons un coût fixe couvrant tout l'horizon de planification. Ce coût dépend souvent de la zone géographique d'implantation de l'installation. La définition de la configuration d'un réseau spécifique consiste alors à prendre des décisions d'ouverture ou de fermeture de chaque installation du réseau générique. Cela correspond à un problème de localisation.

### 5.2.2.2. Les technologies de fabrication et d'assemblage

Une installation du réseau générique, assurant l'activité de production, est composée d'un ensemble de lignes de production nécessaires pour fabriquer tous les articles physiques qui sont affectés à cette installation. Nous définissons chaque ligne de production par une technologie de fabrication pouvant être par exemple une machine, un process [Dogan et Goetschalckx, 1999] [Martel *et al.*, 2001].

Une technologie de fabrication est définie par :

- les installations potentielles pouvant l'utiliser,
- les articles physiques pouvant être manufacturés (fabriqués ou assemblés) avec cette technologie,
- le cycle de production de chaque article physique sur cette technologie (délai entre le lancement en production de deux lots de l'article physique) exprimé en heures,
- le nombre d'unité de chaque ressource nécessaire pour fabriquer une unité d'un article physique sur cette technologie. Dans notre cas, nous traitons uniquement de la ressource de fabrication. Elle est définie par le temps de fabrication et/ou d'assemblage d'une unité d'un article physique sur cette technologie, exprimé en heures. Les autres ressources sont supposées infinies,
- le nombre d'exemplaires de cette technologie existant initialement dans chaque installation. Ceci correspond à la capacité initiale de production de l'installation,
- la capacité de production maximale d'une installation définie par le nombre maximum d'exemplaires d'une technologie pouvant être implantés.

Nous associons à chaque type de technologie de production un coût fixe d'ouverture et de fermeture. Un coût variable est également associé à la production d'une unité de chaque article physique dans une installation du réseau sur une technologie de fabrication. Ainsi, le coût total de production dépend des volumes des articles fabriqués durant chaque période. Nous négligeons les effets d'échelle et nous considérons ce coût total comme un coût linéaire en fonction du volume traité.

Le dimensionnement de chaque installation ouverte (sélectionnée) consiste alors à :

- affecter les articles physiques aux installations,
- dimensionner les volumes de production de chaque article physique pendant chaque période de l'horizon de planification,
- sélectionner les types de technologies de fabrication et d'assemblage à implanter dans l'installation pour fabriquer chaque article physique,
- répartir les volumes de production de chaque article physique sur les technologies de production sélectionnées,
- dimensionner la capacité de chaque technologie de production sélectionnée en déterminant le nombre d'exemplaires de chaque technologie à ouvrir et/ou à fermer.

Ce problème correspond au problème d'allocation.

### 5.2.2.3. Le stockage

Pour notre modèle, nous ferons l'hypothèse que si une installation est ouverte, elle abrite automatiquement un centre de stockage dont la capacité n'est pas limitée. Nous regroupons dans un même point les stocks d'articles physiques approvisionnés à partir d'autres installations du réseau pour des besoins de production et les stocks d'articles physiques destinés à la distribution vers les clients et éventuellement vers d'autres installations.

Les coûts fixes d'ouverture et de fermeture d'un centre de stockage sont implicitement pris en compte dans les coûts fixes d'ouverture et de fermeture des installations. Nous associons au stockage d'une unité de chaque article physique dans une installation un coût variable de stockage. Le coût total de stockage dans une installation dépend alors des volumes stockés pendant chaque période de planification. C'est un coût linéaire.

Les volumes de stocks d'un article physique en fin de chaque période dans une installation ouverte sont calculés par une formule de conservation de flux des articles dans cette installation. Toutefois, pour pallier aux différents aléas de production, de transport et de variation de la demande et pour prendre en compte la rotation des articles en production et en transport, le stock en fin de période de chaque article est borné par un stock minimal de sécurité et de rotation.

### 5.2.2.4. Les clients

Un ensemble de clients est donné. Les clients ont des demandes déterministes pour tout article pendant toute période. Nous supposons que les demandes des clients sont stables et ne dépendent pas du niveau de service fourni par les installations. Dans notre cas, les demandes clients peuvent s'exprimer soit sur les articles physiques, soit sur les articles logiques définis dans la nomenclature générique. A partir de chaque demande, nous exprimons les besoins relatifs aux autres articles de la nomenclature générique et par conséquent les volumes de production des articles physiques dans les installations. Ces volumes d'articles physiques sont ensuite acheminés vers les clients. En effet, le dimensionnement des installations du réseau se fait de manière à satisfaire les demandes de tous les clients pendant chaque période.

La demande de chaque client peut être satisfaite soit à partir d'une seule installation (single sourcing), soit à partir de plusieurs installations (multiple sourcing).

### 5.2.2.5. Les liens de transport

Les différents flux des articles physiques qui circulent entre les installations et entre les installations et les clients nécessitent des liens de transport. L'activité de transport sur un lien est assurée par un et un seul mode de transport qui peut être soit par voie terrestre (camions), soit par voie ferroviaire, aérienne ou maritime.

Un mode de transport potentiel entre deux nœuds du réseau est caractérisé par :

- un coût fixe d'utilisation sur un lien et sur tout l'horizon de planification,
- un coût variable de transport d'une unité d'un article physique,
- un délai de transport exprimé en heures : ce délai est faible devant la durée totale d'une période (trimestre). Par conséquent, nous supposons que tout transport commence et finit à la même période.
- une cadence de transport définie comme un cycle de transport (délai entre deux livraisons successives) exprimée en heures.

Nous ferons l'hypothèse que les capacités de transport ne sont pas limitées, quel que soit le mode de transport utilisé sur un lien.

### 5.2.3. Conclusion

Après la description de la nomenclature générique et des différentes hypothèses prises pour la définition du réseau logistique, nous aboutissons à un problème de localisation-allocation d'un réseau de production/distribution. Il correspond à un problème de planification stratégique multi-sites, multi-périodes, multi-articles, multi-échelons et déterministe.

Les objectifs principaux sont de définir simultanément une nomenclature spécifique de produit et son réseau spécifique de production/distribution en minimisant le coût global de fonctionnement, tout en répondant aux besoins et demandes des clients.

La difficulté et l'originalité de la modélisation que nous proposons résident essentiellement dans :

- la formalisation des variables et des contraintes liées à l'existence des différents articles de la nomenclature générique, selon qu'ils soient logiques ou physiques,
- la formalisation des contraintes d'existence et de sélection de liens de nomenclature entre les articles de la nomenclature générique selon qu'ils soient de type "ET" ou de type "OU",
- l'expression des contraintes de conservation de flux des articles sur les nœuds du réseau selon que les articles soient physiques ou logiques et selon que les nœuds correspondent à des installations ou à des clients.

## 5.3. Formulation du problème

Nous proposons de modéliser le problème de conception du réseau logistique et de la recherche de la meilleure instance de la nomenclature générique sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers. Le modèle minimise une fonction objectif sous diverses contraintes. Nous adoptons, comme fonction objectif, la minimisation d'un coût total de fonctionnement du réseau logistique. La fonction coût regroupe les coûts de production, les coûts de stockage, les coûts de gestion et les coûts de transport.

Minimiser la fonction coût total de la chaîne =

- coûts variables de fabrication et d'assemblage des articles
- + coûts fixes d'ouverture et de fermeture des sites de production
- + coûts fixes d'ouverture et de fermeture des lignes de production
- + coûts variables de stockage des articles
- + coûts fixes d'existence des articles
- + coûts variables de transport des articles physiques
- + coûts fixes d'existence des modes de transport

Sous les contraintes de :

1. structure de la nomenclature générique,
2. restriction des variables réelles,
3. conservation de flux d'articles physiques et logiques sur les nœuds du réseau,

4. existence d'au moins un site de production,
5. existence des technologies de fabrication et d'assemblage dans les installations,
6. capacité de production dans chaque installation,
7. transport des articles physiques,
8. stocks des articles physiques dans les installations,
9. configuration du réseau et de la nomenclature.

## 5.4. Les notations utilisées

Nous présentons les notations que nous utilisons par familles d'appartenance : notations relatives aux ensembles d'articles, de nœuds et d'activités, les notations relatives aux coûts et autres notations.

### 5.4.1. Les ensembles

#### Ensembles des articles et nomenclature

La nomenclature générique du produit est modélisée sous la forme d'un graphe sans cycle. Nous notons par l'ensemble  $P$  tous les articles de la nomenclature générique qui traversent le réseau logistique et par  $P_c$ , l'ensemble des articles ayant une demande externe exprimée par les clients.

Les articles de la nomenclature peuvent être soit physiques, soit logiques ( $P = \Phi \cup \bar{\Phi}$ ) :

- $\Phi$  : ensemble des articles physiques,
- $\bar{\Phi}$  : ensemble des articles logiques.

Pour modéliser la structure arborescence de la nomenclature, nous définissons pour chaque article sa nomenclature directe (ses composants et ses composés) par les deux sous-ensembles suivants :

- $BOM_p$  : ensemble des articles qui entrent dans la composition d'un article  $p$  (nomenclature de  $p$ ),
- $BOM_p^{-1}$  : ensemble des articles qui peuvent être constitués de l'article  $p$ .

Les articles peuvent être de type "ET" ou de type "OU" :

- $P^\wedge$  : ensemble des articles de type "ET",
- $P^\vee$  : ensemble des articles de type "OU".

#### Autres ensembles

- $U$  : ensemble des d'installations potentielles du réseau qui peuvent fabriquer et/ou assembler et/ou stocker et/ou distribuer au moins un article,
- $C$  : ensemble des clients,

- $F$  : ensemble des fournisseurs considérés comme extérieurs au réseau,
- $M$  : ensemble des modes de transport,
- $R$  : ensemble de technologies de fabrication et/ou d'assemblage,
- $T$  : ensemble de périodes de l'horizon de planification.

### 5.4.2. Les indices

- $p, q$  : indices des articles,
- $u, v$  : indices des nœuds du réseau (installations, fournisseurs et clients),
- $t$  : indice de temps (périodes de planification, temps de transport, temps de fabrication)
- $m$  : indice de modes de transport,
- $r$  : indice de technologies de fabrication et d'assemblage.

### 5.4.3. Les paramètres coûts

- $UCV_{p,r,u}$  : coût variable de fabrication ou d'assemblage d'une unité de l'article physique  $p$  avec la technologie  $r$  dans une installation  $u$ ,
- $UCFO_{r,u}$  : coût fixe d'ouverture d'une technologie de fabrication  $r$  dans une installation  $u$ ,
- $UCFF_{r,u}$  : coût fixe de fermeture d'une technologie de fabrication  $r$  dans une installation  $u$ ,
- $UCFO_u$  : coût fixe d'ouverture d'une installation  $u$ ,
- $UCFF_u$  : coût fixe de fermeture d'une installation  $u$ ,
- $SCV_{p,u}$  : coût variable de stockage d'une unité de l'article physique  $p$  dans une installation  $u$ ,
- $ECF_p$  : coût fixe d'existence d'un article  $p$ ,
- $MCV_{p,u \rightarrow v,m}$  : coût variable de transport d'une unité de l'article physique  $p$  entre une installation  $u$  et une autre installation ou un client  $v$  par le mode de transport  $m$ ,
- $MCF_{u \rightarrow v,m}$  : coût fixe d'existence d'un mode de transport  $m$  entre une installation  $u$  et une autre installation ou un client  $v$ .

### 5.4.4. Autres paramètres

- $CDemand_{p,u,t}$  : demande en article  $p$  du client  $u$  à la période  $t$ ,
- $\alpha_{p \leftarrow q}$  : nombre d'unités de l'article  $p$  nécessaires pour obtenir une unité de l'article  $q$ ,
- $URes_{p,r}$  : délai de fabrication ou d'assemblage d'une unité de l'article physique  $p$  sur une technologie de type  $r$  exprimé en heures,
- $D$  : durée totale d'une période de planification exprimée en heures,

- $CProd_{p,r}$  : cycle de production d'un article physique  $p$  sur la technologie  $r$  exprimé en heures,
- $Cow_p$  : pourcentage du temps de cycle de chaque activité (production et transport) qu'on désire avoir en stock pour chaque article  $p$ ,
- $d_{m,u \rightarrow v}$  : délai de transport par le mode de transport  $m$ , entre une installation  $u$  et une autre installation ou un client  $v$  exprimé en heures,
- $CTrans_{u \rightarrow v, m}$  : cycle de transport entre deux nœuds  $u$  et  $v$  par le mode  $m$  exprimé en heures,
- $LP_{r,u}^0$  : nombre d'exemplaires d'une technologie de fabrication de type  $r$  qui existent initialement dans une installation  $u$ ,
- $MaxLP_{r,u}$  : nombre maximum d'exemplaires de la technologie de fabrication  $r$  pouvant être implantées dans une installation  $u$ ,
- $Y_{p,u,0}$  : stock saisonnier de l'article physique  $p$  dans une installation  $u$  en début de l'horizon de planification (période 0),
- $Y_{p,u,T}$  : stock saisonnier de l'article physique  $p$  dans une installation  $u$  en fin de l'horizon de planification (période  $T$ ),
- $M_\infty$  : valeur arbitrairement grande, supérieure à toute quantité pouvant être stockée, produite ou transportée pour un article et une période donnée.

### 5.4.5. Les variables de décision

La prise de décision concerne à la fois la structure des articles, la configuration de la chaîne, le dimensionnement de chaque installation de la chaîne, l'affectation de la production et du stockage aux installations et la distribution des articles fabriqués vers les clients et entre les installations. Les variables de décisions sont donc décomposées en variables entières et variables réelles.

#### 5.4.5.1. Les variables entières

- à l'existence d'un article physique ou logique de la nomenclature générique, nous associons une variable binaire :

$$\lambda_p = \begin{cases} 1 & \text{si l'article } p \text{ existe,} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- pour la sélection des liens de nomenclature d'un article de type "OU", nous associons une variable binaire à l'existence de chaque lien avec ses articles composants, tel que :

$$\lambda_{p \leftarrow q} = \begin{cases} 1 & \text{si le lien de nomenclature } q \rightarrow p \text{ existe, avec } p \in BOM_q \text{ et } q \in P^\vee, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- la décision d'ouverture ou de fermeture d'une installation du réseau logistique est modélisée par la variable binaire suivante :

$$X_u = \begin{cases} 1 & \text{si l'installation } u \text{ existe (ouverte),} \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

- la variable binaire  $X_{r,u}$  exprime l'existence d'une technologie de fabrication dans une installation :

$$X_{r,u} = \begin{cases} 1 & \text{si la technologie de fabrication } r \text{ existe dans l'installation } u, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

- les deux variables entières suivantes sont introduites pour dimensionner les capacités de production des installations. Elles correspondent aux nombres d'exemplaires de chaque type de technologies de fabrication à ouvrir ou à fermer dans une installation :

$LPO_{r,u}$  : nombre d'exemplaires de la technologie de fabrication  $r$  à ouvrir dans une installation  $u$ ,

$LPF_{r,u}$  : nombre d'exemplaires de la technologie de fabrication  $r$  à fermer dans une installation  $u$ ,

- la décision de choix d'un mode de transport entre deux nœuds du réseau est définie par la variable suivante :

$$Z_{u \rightarrow v, m} = \begin{cases} 1 & \text{si le mode de transport } m \text{ existe entre l'installation } u \text{ et l'installation} \\ & \text{ou le client } v, \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

#### 5.4.5.2. Les variables réelles

Les variables réelles sont utilisées pour modéliser les flux des articles physiques et logiques générés par les activités du réseau logistique.

- $X_{p,u,t}$  : besoin net en article  $p$  (physique ou logique) dans une installation ou un client  $u$  à la période  $t$ ,
- $X_{q \rightarrow p, u, t}$  : besoin net en article  $q$  de type "OU" ( $q \in P^V$ ) qui sera satisfait à l'aide du composant  $p$  ( $p \in BOM_q$ ) dans une installation ou chez un client  $u$  à la période  $t$ . Pour tout article  $q$  de type "OU", il faut sélectionner un de ses composants  $p$ . La sélection de ce composant fera qu'un besoin net sur l'article  $q$  déclenchera un besoin brut en article  $p$ . La variable  $X_{q \rightarrow p, u, t}$  donne le besoin net en article  $q$  qui sera satisfait à l'aide de l'article  $p$ . En conséquence, le besoin brut sur l'article  $p$  obtenu à partir de l'article  $q$  sera  $\alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q \rightarrow p, u, t}$ .
- $X_{p,r,u,t}$  : quantité de l'article physique  $p$  fabriquée ou assemblée sur une technologie de type  $r$  dans une installation  $u$  à la période  $t$ ,
- $Y_{p,u,t}$  : quantité de l'article physique  $p$  stockée dans une installation  $u$  en fin de période  $t$ ,
- $Z_{p,u \rightarrow v, m, t}$  : quantité de l'article physique  $p$  transportée entre une installation ou un fournisseur  $u$  et une autre installation ou un client  $v$  par le mode de transport  $m$  à la période  $t$ .

### 5.5. Formulation mathématique du modèle

En se basant sur le descriptif des données et des variables de décisions définies précédemment, nous pouvons construire un modèle d'optimisation qui nous permettra d'identifier

simultanément la meilleure instance de la nomenclature du produit et la structure optimale de sa chaîne logistique.

Le modèle d'optimisation est un programme linéaire en nombres entiers minimisant le coût total de la chaîne logistique sous diverses contraintes.

### 5.5.1. La fonction objectif

La fonction coût global  $CT$  de fonctionnement de la chaîne logistique regroupe tous les coûts fixes et variables de production, de stockage, de transport et d'existence des articles de la nomenclature.

La fonction objectif coût global  $CT$  résultante est une fonction linéaire.

Minimiser  $CT =$

coûts variables de fabrication et d'assemblage des articles physiques

$$\sum_p \sum_r \sum_u \sum_t UCV_{p,r,u} \cdot X_{p,r,u,t}$$

coûts fixes d'ouverture et de fermeture des technologies de fabrication et d'assemblage

$$+ \sum_r \sum_u UCFO_{r,u} \cdot LPO_{r,u} + \sum_r \sum_u UCFE_{r,u} \cdot LPF_{r,u}$$

coûts fixes d'ouverture et de fermeture des installations

$$+ \sum_u UCFO_u \cdot X_u + \sum_u UCFE_u \cdot (1 - X_u)$$

coûts variables de stockage des articles physiques

$$+ \sum_p \sum_u \sum_t SCV_{p,u} \cdot Y_{p,u,t}$$

coûts fixes d'existence des articles

$$+ \sum_p ECF_p \cdot \lambda_p$$

coûts variables de transport des articles physiques entre les nœuds du réseau

$$+ \sum_p \sum_u \sum_{v \neq u} \sum_m \sum_t MCV_{p,u \rightarrow v,m} \cdot Z_{p,u \rightarrow v,m,t}$$

coûts fixes d'existence des modes de transport entre les nœuds du réseau

$$+ \sum_u \sum_{v \neq u} \sum_m MCF_{u \rightarrow v,m} \cdot Z_{u \rightarrow v,m}$$

## 5.5.2. Les contraintes

### 5.5.2.1. Contraintes sur la structure de la nomenclature générique

Pour modéliser la nomenclature générique, nous avons introduit des variables binaires pour exprimer l'existence ou non des articles (physiques ou logiques) et des variables binaires pour modéliser l'existence des liens de nomenclature. Selon le type de relation ("ET" ou "OU") d'un article envers ses articles composants (fils), les contraintes sur les variables d'existence des articles changent. De plus, les variables d'existence de liens de nomenclature n'ont d'utilité que dans le cas où les articles sont de type "OU". Dans ce cas, il faut conditionner l'existence du lien de nomenclature avec l'existence des articles.

#### Cas des articles de tout type ("ET" ou "OU")

La Figure 5.3 montre les variables binaires liées à l'existence des articles mais aussi à celle des liens de nomenclature des articles de type "ET" et "OU" ( $q_1$  et  $q_2$ ) avec leurs composants ( $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$ ).

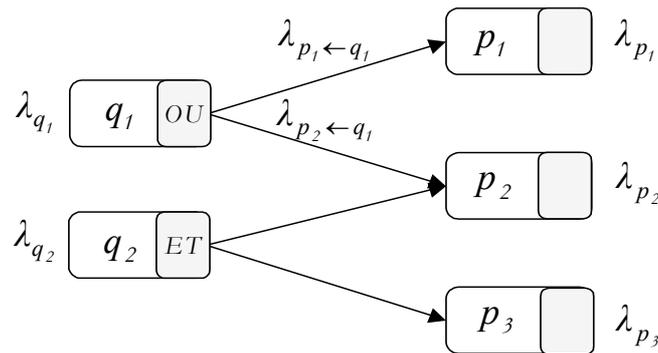


Figure 5.3 – Variables d'existence d'articles et de liens de nomenclature

Si un article  $p$  sur lequel ne s'exprime aucune demande client existe, alors soit un de ses articles père de type "ET" existe, soit un lien de nomenclature avec un de ses articles père de type "OU" est utilisé, d'où :

$$\lambda_p \leq \sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^\wedge} \lambda_q + \sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^\vee} \lambda_{p \leftarrow q} \quad \forall p \in P - P_c \quad (1.1)$$

Le besoin net d'un article (physique ou logique) dans une installation ou chez un client est conditionné par l'existence de l'article, d'où :

$$X_{p,u,t} \leq M_\infty \cdot \lambda_p \quad \forall p \in P, u \in U \cup C, t \in T \quad (1.2)$$

### Cas des articles de type "ET"

Dans le cas des articles de type "ET", la sélection de lien de nomenclature n'a pas lieu. Les contraintes de nomenclature lient uniquement les variables d'existence des articles (Figure 5.4).

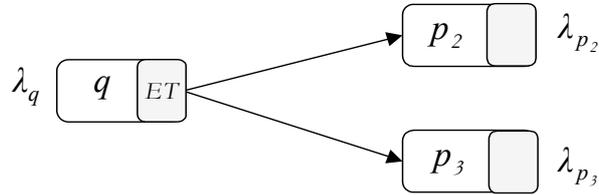


Figure 5.4 – Liens de nomenclature d'un article en "ET"

Si un article  $q$  de type "ET" existe, alors tous les articles appartenant à sa nomenclature existent aussi :

$$\lambda_p \geq \lambda_q \quad \forall p \in BOM_q, q \in P^\wedge \quad (1.3)$$

### Cas des articles de type "OU"

Les contraintes ci-dessous sont exprimées pour un article de type "OU". La Figure 5.5 illustre les liens de nomenclature d'un article en "OU" avec ses composants.

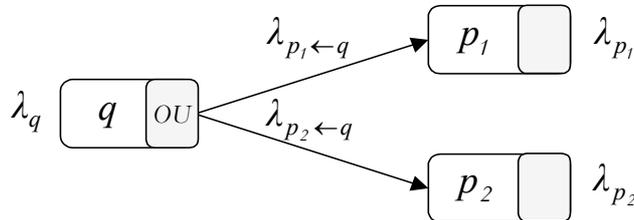


Figure 5.5 – Liens de nomenclature d'un article en "OU"

Un lien de nomenclature entre un article de type "OU" et son composant n'existe que si les deux articles (composé et composant) existent simultanément :

$$\lambda_{p \leftarrow q} \leq \lambda_q \quad \forall p \in BOM_q, q \in P^\vee \quad (1.4)$$

$$\lambda_{p \leftarrow q} \leq \lambda_p \quad \forall p \in BOM_q, q \in P^\vee \quad (1.5)$$

Si un article  $q$  de type "OU" existe, alors un et un seul lien est sélectionné dans sa nomenclature :

$$\sum_{p \in BOM_q} \lambda_{p \leftarrow q} = \lambda_q \quad \forall q \in P^\vee \quad (1.6)$$

Si un besoin s'exprime sur un article  $q$  de type "OU", alors il déclenche un besoin pour l'un de ses articles composants, d'où :

$$\sum_p^{BOM_q} X_{q \rightarrow p, u, t} = X_{q, u, t} \quad \forall q \in P^\vee, u \in U \cup C, t \in T \quad (1.7)$$

Si le lien entre un article composé  $q$  de type "OU" et son composant  $p$  existe ( $\lambda_{p \leftarrow q} = 1$ ), le besoin exprimé sur l'article  $q$  engendre un besoin pour l'article composant  $p$  :

$$X_{q \rightarrow p, u, t} \leq M_\infty \cdot \lambda_{p \leftarrow q} \quad \forall q \in P^\vee, p \in BOM_q, u \in U \cup C, t \in T \quad (1.8)$$

### Bilan

En définitive, si nous considérons un lien de nomenclature ( $q \rightarrow p$ ), Le besoin net sur l'article  $q$  déclenche un besoin brut sur l'article  $p$  qui sera :

- $\alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q, u, t}$  si l'article  $q$  est de type "ET" ( $q \in P^\wedge$ ),
- $\alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q, u, t}$  si l'article  $q$  est de type "OU" ( $q \in P^\vee$ ).

#### 5.5.2.2. Contraintes sur les variables réelles du modèle

Chaque article de la nomenclature générique (physique et logique) peut avoir un besoin dans un nœud du réseau (installation et client) pendant une période, d'où :

$$X_{p, u, t} \geq 0 \quad \forall p \in P, u \in U \cup C, t \in T \quad (2.1)$$

Par définition, un article logique ne se fabrique pas sur une technologie de fabrication, ne se stocke pas et ne se transporte pas, d'où les contraintes ci-dessous :

$$X_{p, r, u, t} = 0 \quad \forall p \in \bar{\Phi}, r \in R, u \in U, t \in T \quad (2.2)$$

$$Y_{p, u, t} = 0 \quad \forall p \in \bar{\Phi}, u \in U \cup C, t \in T \quad (2.3)$$

$$Z_{p, u \rightarrow v, m, t} = 0 \quad \forall p \in \bar{\Phi}, u \in U \cup F, v \in U \cup C, m \in M, t \in T \quad (2.4)$$

A l'opposé, un article physique ne se fabrique pas et ne se stocke pas chez un client, d'où :

$$X_{p, r, u, t} = 0 \quad \forall p \in \Phi, r \in R, u \in C, t \in T \quad (2.5)$$

$$Y_{p, u, t} = 0 \quad \forall p \in \Phi, u \in C, t \in T \quad (2.6)$$

Dans une installation où les articles physiques sont fabriqués, le besoin net d'un article physique pendant une période est obtenu par la somme des quantités produites sur toutes les technologies de fabrication implantées. Nous avons alors la contrainte suivante :

$$X_{p,u,t} = \sum_r^R X_{p,r,u,t} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T \quad (2.7)$$

L'activité de production des articles physiques est assurée par les installations. Par conséquent, une installation peut stocker un article physique et elle peut livrer un article physique aux clients et aux autres installations, d'où :

$$Z_{p,u \rightarrow v,m,t} \geq 0 \quad \forall p \in \Phi, u \in U \cup F, v \in U \cup C, m \in M, t \in T \quad (2.8)$$

Si nous n'imposons pas de quantité minimale de stocks d'un article physique pour une installation, alors le stock final d'un article en fin de toute période doit être positif ou nul, d'où :

$$Y_{p,u,t} \geq 0 \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T \quad (2.9)$$

### 5.5.2.3. Contraintes de conservation de flux d'articles sur les nœuds

L'équation de conservation de flux spécifie que pour toute période de planification, pour tout article et en tout nœud du réseau logistique (installations et clients), la variation de stock est égale à la somme des quantités générées ou apportées sur ce nœud moins la somme des besoins bruts exprimés sur l'installation, ou transportés vers d'autres nœuds.

Comme les fournisseurs sont considérés à capacité infinie, ils peuvent fournir à la demande. Les matières approvisionnées étant par convention des matières premières, nous n'avons pas besoin de générer des besoins bruts pour d'autres composants à partir de leur consommation. En conséquence, il n'y a pas lieu d'écrire d'équation de conservation du flux dans les installations des fournisseurs. Les produits qu'ils fournissent apparaîtront comme flux entrant dans les équations de conservation du flux des autres installations du réseau.

Enfin, selon que l'on se place sur une installation ou chez un client et que l'on considère un article physique ou logique, l'équation de conservation prend une forme différente car les flux à considérer sont différents.

#### Conservation de flux d'articles physiques sur une installation

Nous représentons par la Figure 5.6 les différents flux d'articles physiques définis sur une installation du réseau logistique.

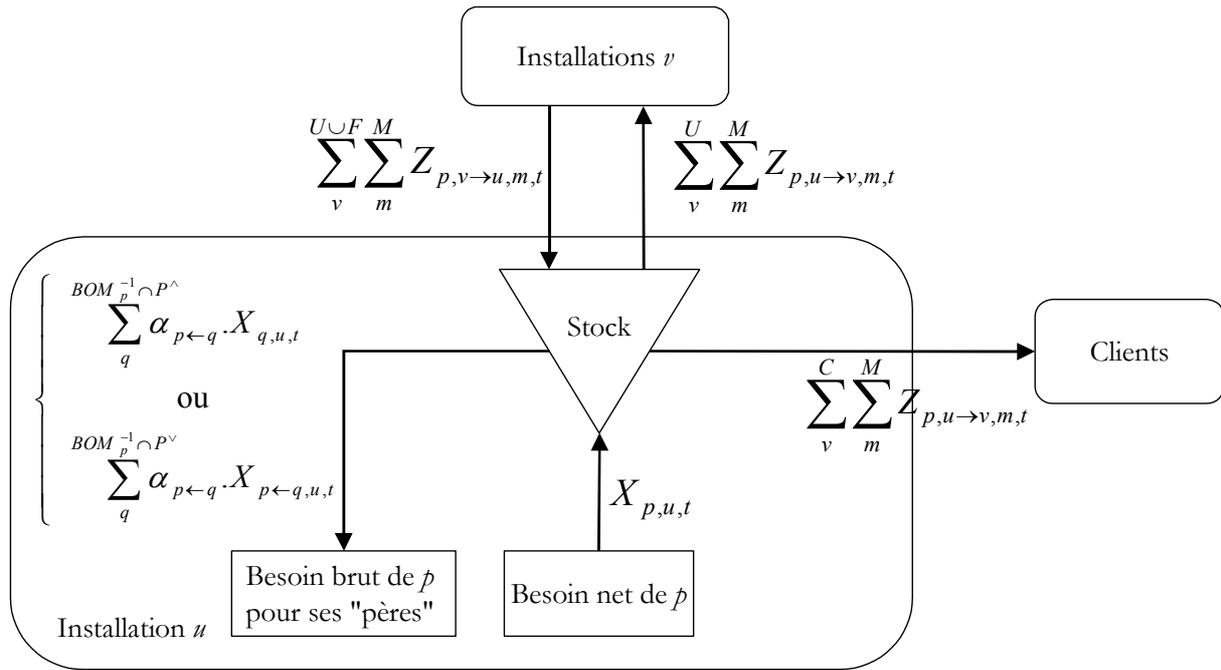


Figure 5.6 – Flux des articles physiques sur une installation

Pour qu'il y ait conservation de flux d'un article physique dans une installation, il faut que la variation du stock saisonnier de l'article ( $Y_{p,u,t} - Y_{p,u,t-1}$ ) soit égale à la différence entre les flux entrants et les flux sortants. Les flux entrants d'un article physique regroupent les quantités fabriquées sur les différentes lignes pendant la période (besoin net  $X_{p,u,t}$ ) et les quantités

provenant des autres installations pendant la période ( $\sum_{v \neq u} \sum_m^{U \cup F, M} Z_{p,v \rightarrow u,m,t}$ ). Les flux sortants

regroupent les quantités livrées aux autres installations et clients ( $\sum_{v \neq u} \sum_m^{U \cup C, M} Z_{p,u \rightarrow v,m,t}$ ), les besoins

bruts de cet article pour ses articles pères de type "ET" ( $\sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^{\wedge}} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q,u,t}$ ) et pour ses articles

pères de type "OU" ( $\sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^{\vee}} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q,u,t}$ ).

L'équation d'équilibre de flux d'un article physique sur une installation s'écrit alors comme suit (équation 3.1) :

$$Y_{p,u,t} - Y_{p,u,t-1} = X_{p,u,t} + \sum_{v \neq u} \sum_m^{U \cup F, M} Z_{p,v \rightarrow u,m,t} - \sum_{v \neq u} \sum_m^{U \cup C, M} Z_{p,u \rightarrow v,m,t} - \sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^{\wedge}} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q,u,t} - \sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^{\vee}} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q,u,t}$$

$$\forall p \in \Phi, u \in U, t \in T \quad (3.1)$$

Pour les articles physiques dans une installation, les stocks saisonniers sont inclus dans le modèle pour lisser la production sur un horizon de planification. Les stocks saisonniers au début et à la fin de l'horizon de planification sont égaux. Nous posons alors :

$$Y_{p,u,0} = Y_{p,u,T} \quad \forall p \in \Phi, u \in U \quad (3.2)$$

### Conservation de flux d'articles logiques sur une installation

La Figure 5.7 illustre les différents flux des articles logiques sur une installation.

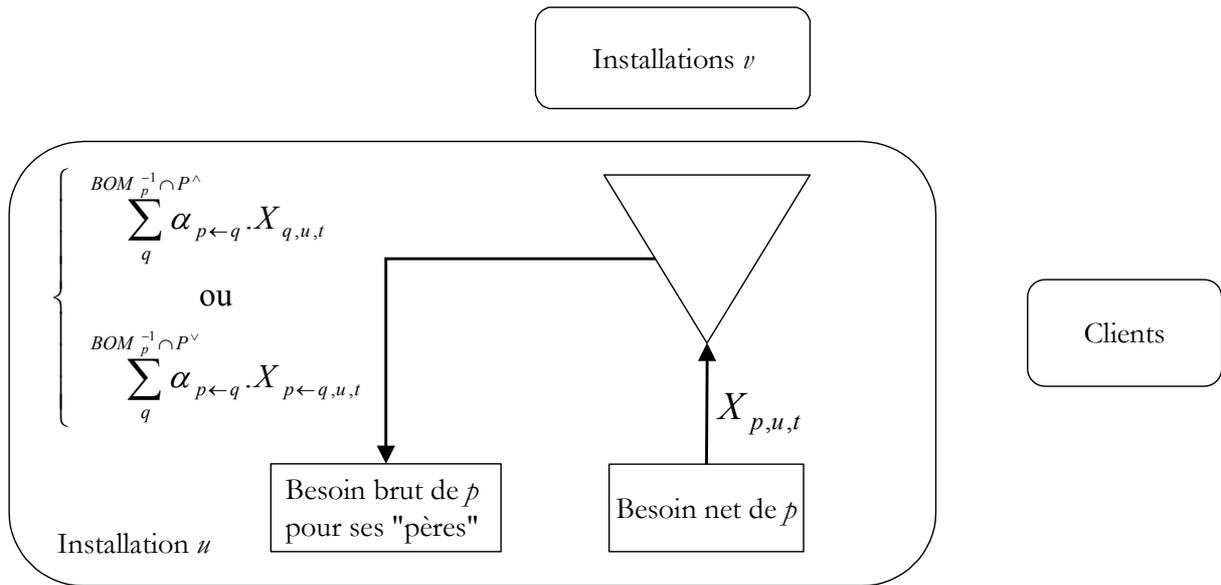


Figure 5.7 – Flux des articles logiques sur une installation

Comme un article logique ne se stocke pas, ne se fabrique pas et ne se transporte pas, les flux générés traduisent uniquement que le besoin net exprimé sur cet article durant une période ( $X_{p,u,t}$ ) doit répondre exactement aux besoins bruts de ses articles "pères" de type "ET"

$$\left( \sum_q^{\text{BOM}_p^{-1} \cap P^\wedge} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q,u,t} \right) \text{ et de ses articles "pères" de type "OU" } \left( \sum_q^{\text{BOM}_p^{-1} \cap P^\vee} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q,u,t} \right).$$

Nous obtenons alors l'équation suivante de conservation de flux d'un article logique sur une installation :

$$X_{p,u,t} = \sum_q^{\text{BOM}_p^{-1} \cap P^\wedge} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q,u,t} + \sum_q^{\text{BOM}_p^{-1} \cap P^\vee} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q,u,t} \quad \forall p \in \bar{\Phi}, u \in U, t \in T \quad (3.3)$$

### Conservation de flux d'articles physiques chez un client

La Figure 5.8 représente les flux des articles physiques chez un client. Rappelons que les activités de production et de stockage d'articles physiques n'ont pas de sens chez un client. Par contre les besoins nets exprimés par le client sont satisfaits à partir des installations (flux d'articles physiques entre les installations et le client).

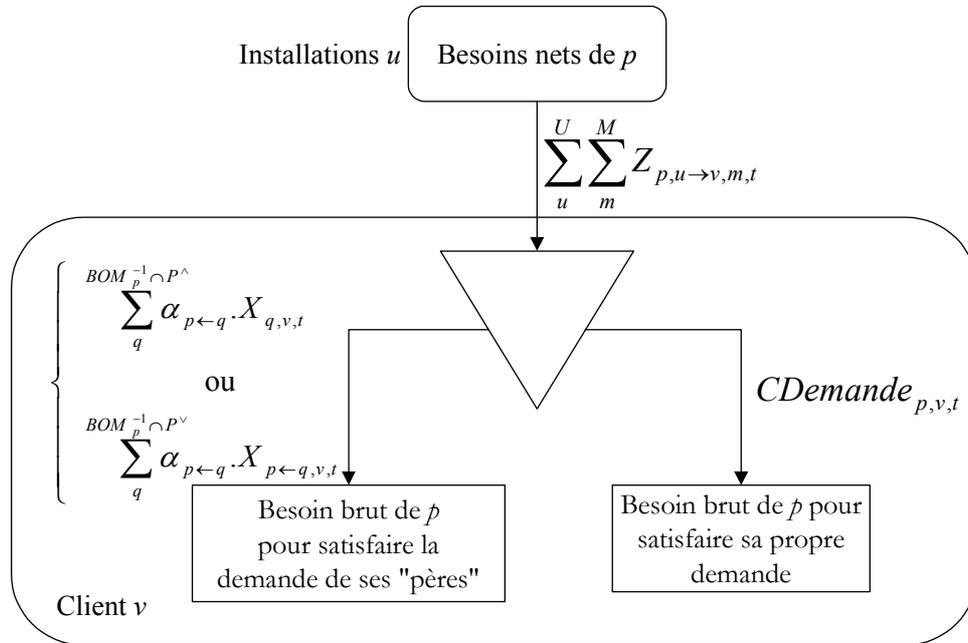


Figure 5.8 – Flux des articles physiques chez un client

L'équation de conservation de flux d'un article physique chez un client correspond à la contrainte de satisfaction de la demande.

En effet, les quantités d'un article physique livrées au client par les installations du réseau pendant une période  $(\sum_{u \neq v} \sum_m Z_{p,u \rightarrow v,m,t})$  permettent de satisfaire son besoin net en cet article. Or ce

besoin net correspond au besoin brut de satisfaction de la demande ( $CDemande_{p,v,t}$ ) de cet article et au besoin brut pour satisfaire la demande de ses articles "pères" de type "ET" ou de type "OU", d'où l'équation (3.4) de conservation de flux d'un article physique chez un client :

$$\sum_{u \neq v} \sum_m Z_{p,u \rightarrow v,m,t} = CDemande_{p,v,t} + \sum_q \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q,v,t} + \sum_q \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q,v,t} \quad \forall p \in \Phi, v \in C, t \in T \quad (3.4)$$

### Conservation de flux d'articles logiques chez un client

Nous illustrons sur la Figure 5.9, les différents flux d'un article logique chez un client.

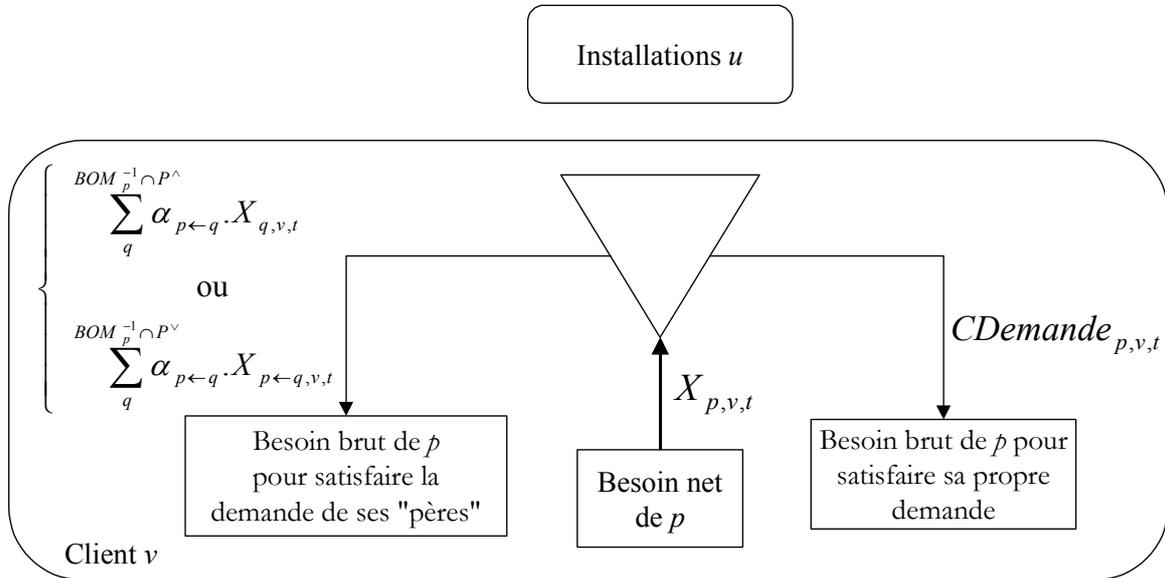


Figure 5.9 – Flux des articles physiques chez un client

Les seuls flux d'articles logiques pouvant être représentés chez un client sont ceux relatifs aux besoins exprimés. Le besoin net en un article logique ( $X_{p,v,t}$ ) exprimé par le client ne doit pas seulement répondre au besoin brut qui correspond à sa demande ( $CDemande_{p,v,t}$ ), mais également celui qui correspond à la demande de ses "pères".

Ainsi, l'équation de conservation de flux d'un article logique chez un client s'exprime comme suit (équation 3.5):

$$CDemande_{p,v,t} = X_{p,v,t} - \sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^\wedge} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{q,v,t} - \sum_q^{BOM_p^{-1} \cap P^\vee} \alpha_{p \leftarrow q} \cdot X_{p \leftarrow q,v,t} \quad \forall p \in \bar{\Phi}, v \in C, t \in T \quad (3.5)$$

#### 5.5.2.4. Contraintes d'existence d'au moins un site de production

L'entreprise mono-site est considérée comme le réseau logistique le plus élémentaire. Un réseau logistique doit contenir au moins une installation qui regroupe toutes les activités, d'où :

$$\sum_u^U X_u \geq 1 \quad (4.1)$$

### 5.5.2.5. Contraintes sur les technologies de fabrication et d'assemblage dans les installations

Une technologie de fabrication n'est implantée dans une installation que si cette installation existe :

$$X_{r,u} \leq X_u \quad \forall r \in R, u \in U \quad (5.1)$$

La fabrication ou l'assemblage d'une quantité d'un article physique par une technologie de fabrication dans une installation pendant une période est contrainte par l'existence de cette technologie dans l'installation :

$$X_{p,r,u,t} \leq M_\infty \cdot X_{r,u} \quad \forall p \in \Phi, r \in R, u \in U, t \in T \quad (5.2)$$

Si une installation contient une technologie de fabrication, alors cette installation doit fabriquer au moins une quantité strictement positive d'un article pendant une ou plusieurs périodes de planification :

$$X_{r,u} \leq \sum_t^T X_{p,r,u,t} \quad \forall p \in \Phi, r \in R, u \in U, t \in T \quad (5.3)$$

### 5.5.2.6. Contraintes sur les capacités de production dans chaque installation

Les contraintes sur les capacités lient les quantités produites au dimensionnement des technologies de fabrication et d'assemblage. La capacité dimensionnée d'une technologie est obtenue par la somme de la capacité ajoutée ( $LPO_{r,u}$ ) avec la capacité initiale ( $LP_{r,u}^0$ ) moins la capacité supprimée ( $LPF_{r,u}$ ).

La première équation spécifie, par type de technologie d'une installation, que la charge périodique générée par les quantités produites doit être inférieure à la capacité dimensionnée :

$$\sum_p^\Phi X_{p,r,u,t} \cdot UR_{es,r,p} \leq D \cdot (LP_{r,u}^0 + LPO_{r,u} - LPF_{r,u}) \quad \forall r \in R, u \in U, t \in T \quad (6.1)$$

La contrainte suivante limite la capacité dimensionnée d'une technologie de fabrication sur une installation par une capacité maximale, soit :

$$(LP_{r,u}^0 + LPO_{r,u} - LPF_{r,u}) \leq MaxLP_{r,u} \cdot X_{r,u} \quad \forall r \in R, u \in U \quad (6.2)$$

### 5.5.2.7. Contraintes sur le transport des articles physiques

La configuration générique du réseau logistique que nous avons illustré en début du chapitre (Figure 5.2) montre trois types de liens de transport : liens entre installations, liens entre installations et clients et liens entre fournisseurs et clients. Ainsi, les contraintes d'existence des liens de transport s'écrivent comme suit (équations (7.1), (7.2), (7.3) et (7.4)).

L'utilisation d'un mode de transport  $m$  entre deux installations  $u$  et  $v$  nécessite l'existence (l'ouverture) des deux installations durant l'horizon de planification :

$$Z_{u \rightarrow v, m} \leq X_u \quad \forall u \in U \cup F, v \in U \cup C, u \neq v, m \in M \quad (7.1)$$

$$Z_{u \rightarrow v, m} \leq X_v \quad \forall u \in U \cup F, v \in U \cup C, u \neq v, m \in M \quad (7.2)$$

La contrainte suivante lie les quantités transportées sur un mode entre deux nœuds à l'existence des articles physiques, soit :

$$Z_{p, u \rightarrow v, m, t} \leq M_\infty \cdot \lambda_p \quad \forall p \in \Phi, u \in U \cup F, v \in U \cup C, u \neq v, m \in M, t \in T \quad (7.3)$$

La contrainte suivante montre que si une quantité d'un article physique  $p$  doit être acheminée par un mode  $m$  entre deux installations du réseau pendant au moins une période ( $Z_{p, u \rightarrow v, m, t} > 0$ ), alors ce mode de transport doit être obligatoirement sélectionné pour relier les deux nœuds :

$$Z_{p, u \rightarrow v, m, t} \leq M_\infty \cdot Z_{u \rightarrow v, m} \quad \forall p \in \Phi, u \in U \cup F, v \in U \cup C, u \neq v, m \in M, t \in T \quad (7.4)$$

### 5.5.2.8. Contraintes sur les stocks des articles physiques

Nous avons introduit, dans l'équation de conservation de flux d'un article physique dans une installation, la variable ( $Y_{p, u, t}$ ) pour exprimer, en fin de chaque période de planification, le stock saisonnier de chaque article physique.

Les deux équations suivantes expriment les contraintes qui conditionnent l'existence des stocks. En effet, le stockage d'une quantité d'un article physique dans une installation est conditionné par l'existence de l'article et l'ouverture de l'installation, d'où :

$$Y_{p, u, t} \leq M_\infty \cdot \lambda_p \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T \quad (8.1)$$

$$Y_{p, u, t} \leq M_\infty \cdot X_u \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T \quad (8.2)$$

Le stock minimum dont doit disposer toute installation est de deux types : le stock d'encours moyen des activités production/transport et le stock de sécurité.

### Le stock d'encours moyen

Le stock d'encours moyen couvre la continuité du flux d'articles. Il dépend du temps de cycle des activités qui sont gérées par une installation. Dans notre cas, deux activités peuvent être gérées par une installation : la production des articles physiques et la livraison des articles physiques aux clients et aux autres installations (transport).

Nous avons alors deux stocks d'encours moyens :

$$- \text{ le stock d'encours moyen de production : } \frac{1}{2.D} \sum_r^R CProd_{p,r} \cdot X_{p,r,u,t} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T$$

$$- \text{ le stock d'encours moyen de livraison : } \frac{1}{2D} \sum_v^{U \cup C} \sum_m^M CTrans_{u,v,m} \cdot Z_{p,u \rightarrow v,m,t} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T$$

### Le stock de sécurité

Nous avons choisi d'exprimer le stock de sécurité d'un article physique comme un pourcentage de couverture ( $Cow_p$ ) du temps de cycle des activités que gère une installation.

Ainsi, une production faite en juste à temps sur une ressource aura un temps de cycle ( $CProd_{p,r}$ ) faible et donc un stock de sécurité faible. Alors qu'une production faite sur stock aura un temps de cycle ( $CProd_{p,r}$ ) plus important et par conséquent un stock de sécurité plus important. Il en est de même pour le choix entre un mode de transport rapide ( $d_{u \rightarrow v,m}$  faible) et à fréquence importante ( $CTrans_{u \rightarrow v,m}$  faible) par rapport à un mode de transport lent ( $d_{u \rightarrow v,m}$  important) à fréquence faible ( $CTrans_{u \rightarrow v,m}$  important). Nous pouvons donc décomposer le stock de sécurité selon les activités de production ou de transport.

- Le stock de sécurité pour couvrir la production :

$$\frac{Cow_p}{D} \sum_r^R CProd_{p,r} \cdot X_{p,r,u,t} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T$$

- Le stock de sécurité pour couvrir l'activité de transport en distribution et en approvisionnement :

$$\frac{Cow_p}{D} \sum_{v \neq u}^{C \cup U} \sum_m^M (d_{u \rightarrow v,m} + CTrans_{u \rightarrow v,m}) \cdot Z_{p,u \rightarrow v,m,t} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T$$

$$\text{et } \frac{Cow_p}{D} \sum_{v \neq u}^{U \cup F} \sum_m^M (d_{v \rightarrow u,m} + CTrans_{v \rightarrow u,m}) \cdot Z_{p,v \rightarrow u,m,t} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T$$

Nous définissons le stock périodique minimum ( $Ymin_{p,u,t}$ ) d'un article physique sur une installation par la somme des stocks d'encours moyen de production et de livraison, et des stocks de sécurité pour couvrir la production, les approvisionnements et les livraisons.

Le stock minimum ( $Ymin_{p,u,t}$ ) est alors défini par la relation suivante  $\forall p \in \Phi, u \in U, t \in T$  :

$$\begin{aligned}
Ymin_{p,u,t} = & \frac{1}{2.D} \sum_r^R CProd_{p,r} \cdot X_{p,r,u,t} + \frac{1}{2.D} \sum_v^{U \cup C} \sum_m^M CTrans_{u,v,m} \cdot Z_{p,u \rightarrow v,m,t} \\
& + \frac{Cov_p}{D} \sum_r^R CProd_{p,r} \cdot X_{p,r,u,t} \\
& + \frac{Cov_p}{D} \sum_{v \neq u}^{C \cup U} \sum_m^M (d_{u \rightarrow v,m} + CTrans_{u \rightarrow v,m}) Z_{p,u \rightarrow v,m,t} \\
& + \frac{Cov_p}{D} \sum_{v \neq u}^{U \cup F} \sum_m^M (d_{v \rightarrow u,m} + CTrans_{v \rightarrow u,m}) Z_{p,v \rightarrow u,m,t}
\end{aligned}$$

Par la suite, on imposera pour chaque installation ce stock minimum pendant chaque période, d'où la condition :

$$Y_{put} \geq Ymin_{put} \quad \forall p \in \Phi, u \in U, t \in T \quad (8.3)$$

### 5.5.2.9. Contraintes sur les variables binaires et entières

$$X_u \in \{0,1\} \quad \forall u \in U \quad (9.1)$$

$$X_{p,u} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, u \in U \quad (9.2)$$

$$X_{r,u} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, u \in U \quad (9.3)$$

$$Z_{u \rightarrow v,m} \in \{0,1\} \quad \forall u \in U, v \in U \cup C, m \in M \quad (9.4)$$

$$\lambda_{p \leftarrow q} \in \{0,1\} \quad \forall q \in P^\wedge, p \in BOM_q \quad (9.5)$$

$$\lambda_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P \quad (9.6)$$

$$(LPO_{r,u}, LPF_{r,u} \in \mathbb{N}) \quad \forall r \in R, u \in U \quad (9.7)$$

## 5.6. Conclusion

Le modèle développé dans ce chapitre permet de faire un choix simultané sur :

- une offre produit pour répondre à une demande à forte diversité étant donné une représentation générique des solutions possibles, et
- le dimensionnement d'un réseau logistique étant donné un modèle générique des possibilités d'implantations, de dimensionnement des moyens et de modes de transport.

Ce modèle est linéaire en nombres entiers. Nous pouvons donc le résoudre à l'aide d'un solveur MIP classique. Pour notre part, nous avons utilisé ILOG Cplex 6.5.

Ce modèle répond à un besoin d'aide pour anticiper les problématiques logistiques dans les premières phases de préconception de produits qui répondent à une forte diversité de la demande. Il peut être étendu en suivant les principes développés par certains auteurs sur le choix de technologies de production, l'intégration d'effets d'échelle, de taxes et de taux de change. Nous serons alors confronté au problème de l'explosion du nombre de variables entières et donc de l'explosion des temps de calcul. Or, ce type de modèle a pour vocation d'être lancé plusieurs fois pour boucler sur des alternatives de conception, affiner les paramètres (coûts, charge, couverture), tester la sensibilité aux scénarios de demande. Ceci demande donc d'améliorer la méthode de résolution.



# Chapitre 6. Application industrielle

## 6.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons développé un modèle d'optimisation qui permet de définir simultanément la nomenclature d'une famille de produits et son réseau logistique approprié en fonction d'une demande.

Pour le choix de solution de conception de la famille de produits, nous avons défini une nomenclature générique permettant d'énumérer toutes les solutions de conception et de représenter la segmentation de la demande. Pour le dimensionnement de son réseau logistique, nous avons représenté un réseau générique définissant les localisations possibles des sites. Notre objectif est de valider le modèle d'optimisation sur un cas réel.

Nous exposons ainsi dans ce chapitre une application industrielle pour mettre en œuvre le modèle d'optimisation développé.

Nous commençons par détailler les hypothèses et restrictions de départ. Nous décrivons, dans les sections (6.2) et (6.3), la nomenclature générique et le réseau logistique potentiel. Ensuite, la section (6.4) propose des expérimentations du modèle. Nous concluons par une discussion du modèle.

## 6.2. Nomenclature générique

La démarche de conception par pack développée dans le cadre de cette thèse vise à figer dans des packs de nombreuses fonctionnalités, tout en laissant certains choix ouverts. La demande a été décomposée par segment de marché et ventilée sur les différents packs conçus. Les choix restants sont représentés par les sommets en "OU" *Segments* et *Packs* de la nomenclature générique représentée en Figure 6.1.

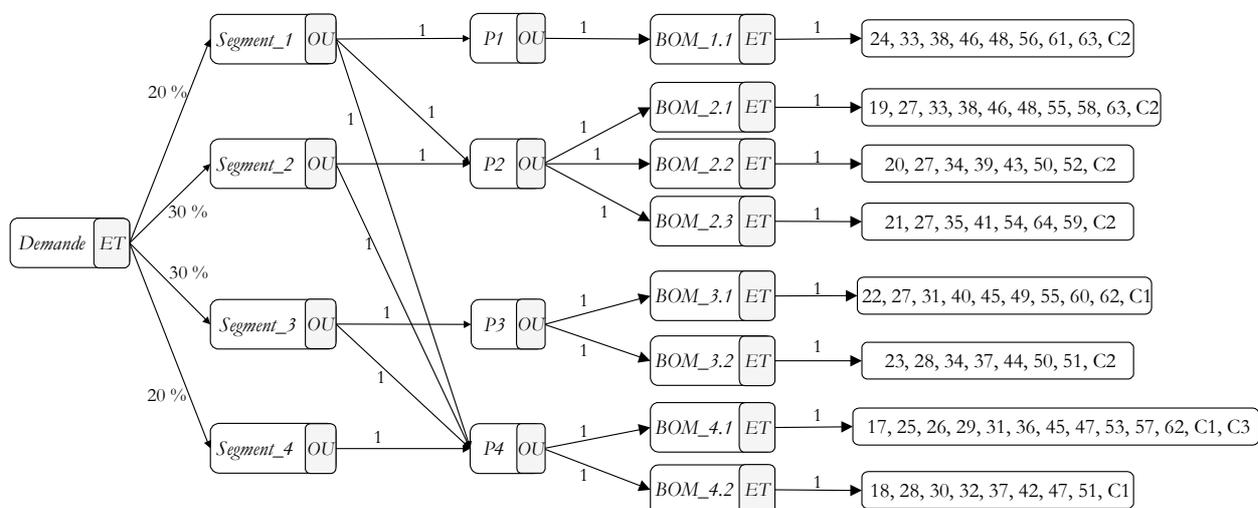


Figure 6.1 – Nomenclature générique

Pour notre application, la nomenclature générique du câblage comprend 68 articles (physiques et logiques), répartis sur cinq niveaux :

- niveau 1 : la demande totale du câblage (1 produit logique de type *ET*),
- niveau 2 : les segments de la demande (4 produits logiques de type *OU*),
- niveau 3 : les solutions packs (4 produits logiques de type *OU*),
- niveau 4 : les solutions nomenclatures *BOM* (8 produits physiques de type *ET*),
- niveau 5 : les modules de câblage (48 produits physiques) et les calculateurs (3 produits physiques).

Par exemple la *BOM\_1.1* est composée d'un seul calculateur (calculateur *C2*) et de sept (7) modules de câblage : *Tableau de bord, Arrière, Avant, Coffre, Moteur, Portes* et *Toit*.

### 6.3. Réseau logistique générique

Nous nous plaçons dans un contexte industriel pour lequel un fournisseur (équipementier automobile) fabrique des packs de câblage électrique pour un donneur d'ordres (client constructeur automobile). Le fournisseur dispose de sites de proximité (avancés) et de sites délocalisés. Les sites avancés peuvent s'approvisionner en modules de câblage auprès des sites délocalisés.

Le client constructeur transmet les commandes au fabricant de câblages. Le fabricant doit alors livrer le câblage automobile dans un faible intervalle de temps en raison d'une contrainte de livraison synchrone chez le constructeur.

Nous considérons dans cette application le cas du développement d'un nouveau véhicule par le constructeur. Etant donnés les volumes en jeu, la configuration et le dimensionnement de la chaîne logistique du fabricant de câblages peuvent être revus. Nous ne considérons pas les effets de la fabrication des câblages pour d'autres modèles de voiture.

La carte de la Figure 6.2 montre les différents nœuds du réseau logistique générique à dimensionner.

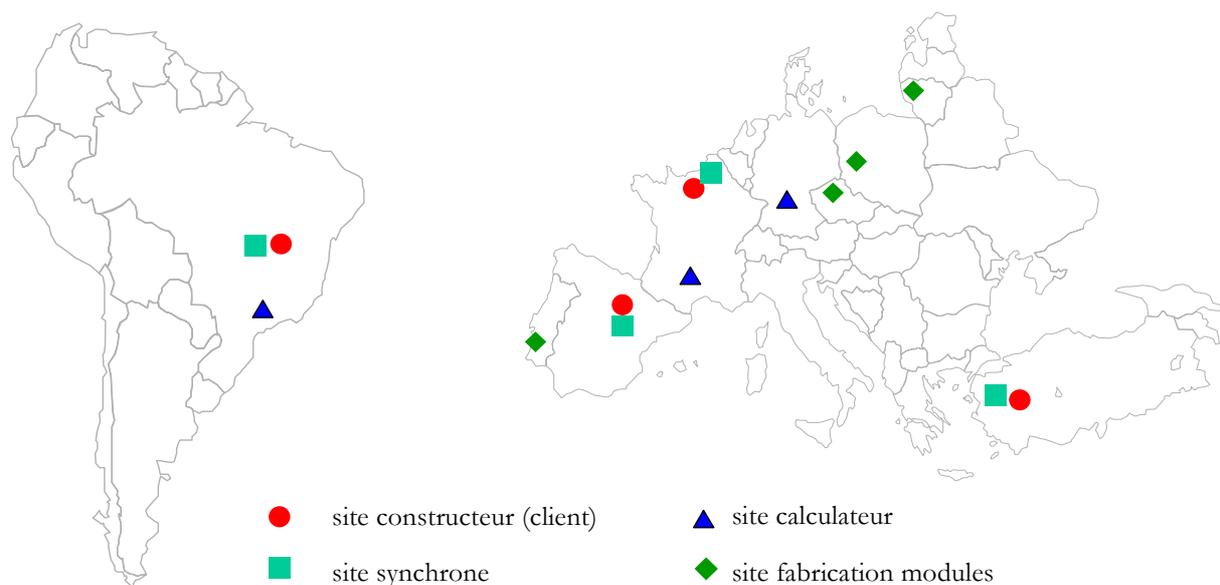


Figure 6.2 – Réseau logistique générique

Tous les sites du réseau existent et d'autres peuvent être ouverts pour le nouveau produit. Le réseau générique est constitué des nœuds suivants.

### **Les clients**

Les clients correspondent aux sites du constructeur automobile répartis à travers le monde. Dans notre cas, nous considérons quatre sites constructeur : France-Nord, Espagne, Turquie et Brésil. Le processus d'assemblage du constructeur automobile est en juste à temps. En effet, le constructeur connaît l'ordre des produits sur sa chaîne d'assemblage seulement quelques heures avant la commande du câblage automobile. Dans notre cas, tous les sites du client fabriquent la même voiture, donc commandent des articles appartenant à la même famille de packs de câblage. Notons que le site client situé au Brésil vient d'être ouvert.

### **Les sites avancés (ou synchrones)**

Devant chaque site client constructeur est implanté un site avancé pour l'assemblage final et éventuellement la fabrication de modules. Pour permettre une livraison synchrone, le délai de transport vers le client est très court (de l'ordre d'une heure). Compte tenu de ce temps de transport (livraison), il subsiste pour le fabricant du câblage moins d'une heure pour l'assemblage final du câblage. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir une main-d'œuvre spécialisée et flexible. Les sites avancés peuvent assurer également la fabrication des modules de câblage. En effet, la fabrication des modules et leur assemblage final nécessitent les mêmes technologies de fabrication et d'assemblage. L'assemblage final consiste soit à assembler le calculateur sur un module de câblage et livrer ensuite des modules de câblage séparés au client constructeur, soit à assembler tous les modules pour livrer un câblage complet au constructeur. Dans les sites avancés, deux types de technologies de production sont implantées : les tables fixes pour la fabrication des petits modules de câblage et les carrousels<sup>4</sup> pour la fabrication des grands modules et pour l'assemblage final des modules. Tous les sites avancés sont déjà en activité sauf celui situé au Brésil. En effet, le client constructeur venant d'ouvrir un site d'assemblage de voitures, l'équipementier veut déterminer les productions à affecter à ce site.

### **Les sites de production**

La fabrication du câblage automobile nécessite deux compétences différentes liées à la fabrication de calculateurs et la fabrication de modules de câblage.

- Sites de fabrication des boîtiers électroniques (calculateurs) : la fabrication des calculateurs nécessite des lignes automatisées de fabrication de haute technologie. Elle fait donc appel à peu de main-d'œuvre mais très qualifiée. Le réseau logistique générique de la Figure 6.2 comprend trois sites calculateurs : deux sites déjà existants (un en France-Sud et un autre en Allemagne) et un autre à éventuellement ouvrir au Brésil. Nous supposons que les sites de fabrication des calculateurs utilisent un seul type de ligne de production. Les calculateurs sont fabriqués sur stocks.
- Sites de fabrication des modules de câblage : la fabrication des modules de câblage ne pouvant pas être automatisée, il faut donc faire appel à une importante main-d'œuvre faiblement qualifiée. La fabrication d'un module est une activité manuelle et répétitive qui

---

<sup>4</sup> Un carrousel est constitué d'un ensemble de planches montées sur un rail afin de pouvoir tourner. Cette technologie de production est souvent utilisée pour décomposer l'ensemble du travail en plusieurs tâches élémentaires. Constitué de plusieurs postes, chaque opérateur effectue donc un nombre limité d'opérations mais toujours identiques, avant que le carrousel ne se mette à tourner.

consiste à assembler des fils, soit sur une table fixe, soit sur un carrousel suivant la taille du module. Les usines sont le plus souvent implantées dans les pays à bas coûts. C'est pour cela que la plupart des usines sont implantées au Portugal, en Europe de l'Est ou en Amérique du sud. Notons que la fabrication de modules peut se faire également en juste à temps sur les sites avancés. Notre réseau générique est composé de quatre sites de fabrication de modules situés au Portugal, en République Tchèque, en Lituanie et en Pologne. Notons que le site de Pologne n'assure pas encore de production de cette famille de câblages. Chaque site de production est composé d'un seul type de table fixe (pour la fabrication par exemple des modules Toit et Coffre) et d'un seul type de carrousel (Fabrication des modules Moteurs, Tableau de bord). Par conséquent, le choix de technologie de fabrication pour chaque module n'a pas lieu. Les modules de câblages sont fabriqués sur stocks dans les usines.

### Les modes de transport

Selon les zones géographiques d'implantation des sites, les différentes liaisons peuvent être assurées par un ou plusieurs modes de transport : par camion, par train, par avion ou par bateau. Pour notre application, nous considérons que les choix de modes de transport sont déjà faits. Les transports intraeuropéens se font par camion et par train, tandis que les transports transatlantiques se font par bateaux.

En définitive, la configuration des sites est la suivante (Figure 6.3) :

- plusieurs sites de fabrication des calculateurs,
- plusieurs sites délocalisés de fabrication des modules,
- un site synchrone d'assemblage final et éventuellement de fabrication de modules proche de chaque client.

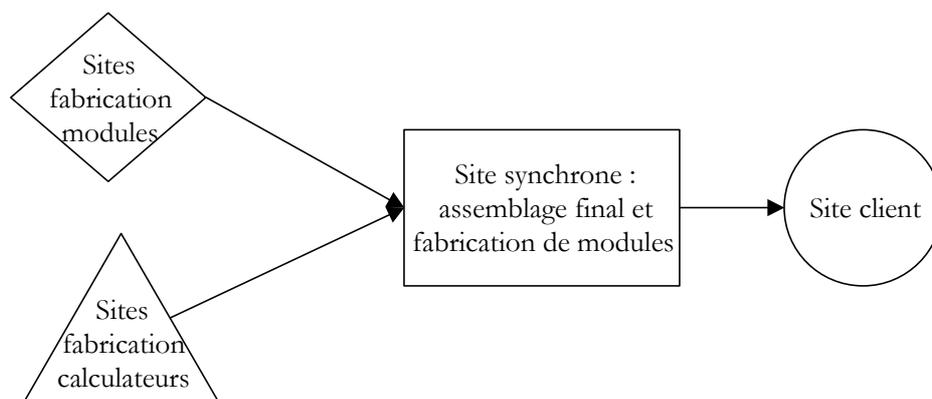


Figure 6.3 – Processus logistique du câblage automobile

## 6.4. Expérimentations

Dans une première section, la nomenclature générique et le réseau logistique générique étant définis, une première recherche de solution va être conduite pour une demande donnée. Les sections suivantes documenteront pour ces mêmes données la sensibilité à des variations de demande, à des variations de coût et à la combinatoire de la nomenclature générique.

### 6.4.1. Résolution pour une demande donnée

#### La demande

La planification stratégique du réseau logistique se fait sur un horizon de deux ans réparti sur huit périodes de trois mois. Les délais de transport entre les différents nœuds du réseau sont négligeables par rapport à la taille de la période.

Les prévisions de la demande portent seulement sur le produit logique *Demande* (niveau 1 de la nomenclature générique). Les prévisions, réparties sur les quatre sites du client constructeur, sont données par le Tableau 6.1.

	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5	Période 6	Période 7	Période 8
Espagne	60150	62000	63750	65000	65000	67200	65200	67000
France	88740	89600	91250	93100	93200	90100	90180	92000
Turquie	17800	18500	19750	20800	22000	22100	22860	23500
Brésil	10000	11000	11250	18500	42000	44250	49200	50000

Tableau 6.1 – Prévisions de la demande de câblage sur huit périodes

#### Résolution

Le modèle décrit dans le Chapitre 5 a été codé en C++ avec la bibliothèque Ilog-Cplex 6.5 sur une station SUN UltraSPARC à 143MHz avec 192 Mo de RAM.

Pour notre application, le problème linéaire généré comporte 30 849 contraintes, 20 073 variables réelles et 559 variables entières. Il a été résolu en 744,77 secondes (environ 12,5 minutes) avec une précision de 0,04 %. La solution optimale obtenue est discutée dans les paragraphes suivants.

#### La nomenclature

La résolution du modèle a permis de lever les "OU" sur la nomenclature générique. La solution produit obtenue est constituée de trois packs : *P2*, *P3*, et *P4* (Figure 6.4). Le pack *P1* n'est pas retenu dans cette solution. En effet, le segment de demande *Segment\_1* est satisfait par le pack *P2*. La Figure 6.4 illustre cette solution et pour chaque pack de cette solution, une nomenclature *BOM* est identifiée :

- Pack *P2* → *BOM\_2.3*
- Pack *P3* → *BOM\_3.1*
- Pack *P4* → *BOM\_4.2*

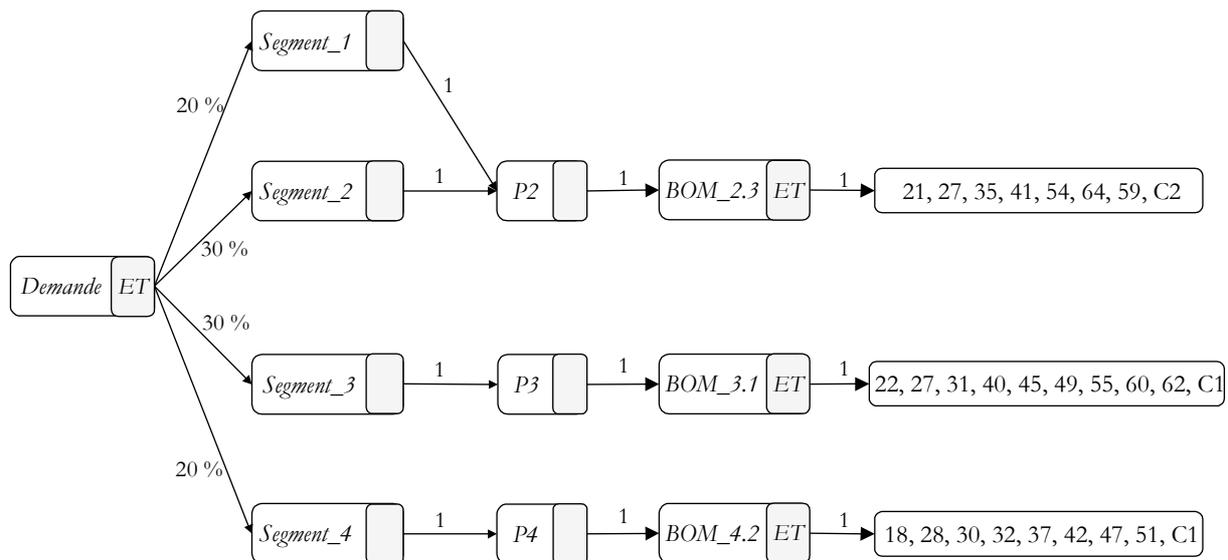


Figure 6.4 – Solution de produit

## Le réseau

### - Les sites de fabrication de modules

Initialement, le réseau générique comptait quatre sites potentiels de production de modules : Portugal, République Tchèque, Lituanie et Pologne. Après résolution du modèle, tous les sites ont été retenus sauf celui de la République Tchèque. En effet, ce site était initialement implanté dans ce pays pour assurer la fabrication et la livraison synchrone d'un autre câblage pour un autre client constructeur situé en Allemagne. Cette demande n'étant pas prise en compte dans l'exemple, ce site se retrouve excentré par rapport aux clients considérés ici.

Notons que le site de Pologne vient d'ouvrir et la solution obtenue montre qu'un volume important de modules est fabriqué sur ce site. Ceci est dû d'une part aux coûts faibles de production et d'autre part à sa situation géographique proche du plus important site avancé, celui de France-Nord. En conséquence, le site du Portugal n'approvisionne pas ce site avancé de France-Nord, il sera exclusivement dédié au site avancé de l'Espagne.

Le site de Lituanie est ouvert pour compléter la production des deux autres sites (Portugal et Pologne) du fait de leur capacité limite de production.

### - Les sites de fabrication de calculateurs

Sur les trois sites potentiels (France-Sud, Allemagne et Brésil), le site implanté en Allemagne n'a pas été retenu pour la fabrication des deux calculateurs de la nomenclature (C1 et C2).

La fabrication de calculateurs nécessite une technologie de production très avancée et automatisée, donc une main-d'œuvre qualifiée. La délocalisation de la production de calculateurs n'apporte pas d'intérêts économiques. Ce sont, par contre, les délais de livraison qui orientent la localisation des sites calculateurs. Le site situé au Brésil est retenu uniquement pour satisfaire la demande locale (site avancé et client constructeur implantés au Brésil).

L'approvisionnement en calculateurs des trois autres sites avancés d'Europe (France-Nord, Espagne et Turquie) est assuré uniquement par le site calculateur France-Sud. Sa situation géographique ("barycentre" des trois sites avancés) est plus avantageuse que celle du site Allemagne.

- Les sites avancés

Dans la formalisation de notre modèle, nous avons imposé l'existence des sites avancés. En effet, tant qu'un site client exprime une demande, le site avancé doit exister pour assurer la livraison synchrone.

Rappelons aussi que pour notre application, les sites avancés peuvent également être affectés à la fabrication de modules de câblage. Or, la solution obtenue montre que seuls les deux sites avancés de Turquie et du Brésil assureront la fabrication de modules. Ceci est rendu possible d'une part, pour bénéficier des coûts faibles de production et d'autre part, pour répondre à la demande locale (coûts de transport nuls). A l'inverse, les coûts élevés de main-d'œuvre en France et en Espagne font que les deux sites avancés France-Nord et Espagne délocalisent toute la production des modules dans les pays à bas coûts de main-d'œuvre (Pologne, Lituanie et Portugal).

Les tableaux ci-dessous montrent les capacités dimensionnées pour chaque site, exprimées en nombre d'exemplaires des différentes technologies de fabrication et d'assemblage.

Technologie de fabrication des modules	Sites de production de modules			
	Portugal	Rép. Tchèque	Lituanie	Pologne
Tables fixes	10	/	/	42
Carrousel	11	/	33	50

Tableau 6.2 – Capacités dimensionnées des sites de production de modules

Technologie de fabrication calculateurs	Sites de production de calculateurs		
	France-Sud	Allemagne	Brésil
Ligne Calculateurs	20	/	5

Tableau 6.3 – Capacités dimensionnées des sites de production de calculateurs

Technologie de fabrication de modules et d'assemblage final	Sites avancés			
	Espagne	France-Nord	Turquie	Brésil
Tables fixes	/	/	11	20
Carrousel	16	22	25	46

Tableau 6.4 – Capacités dimensionnées des sites de production de modules

La carte de la Figure 6.5 illustre la structure du réseau optimal obtenu : les sites ouverts et les différents liens entre sites.

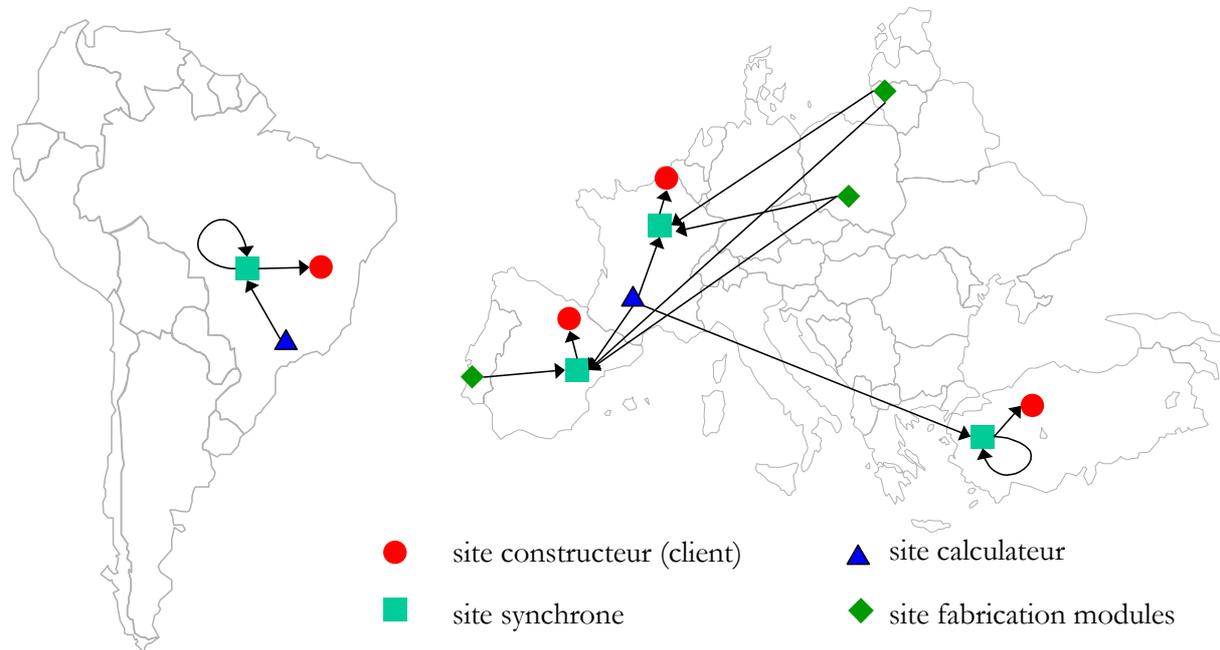


Figure 6.5 – Le réseau optimal

Comme nous l'avons vu précédemment (Chapitre 5), l'apport de la modélisation proposée est multiple et permet simultanément de :

- résoudre le problème de localisation-allocation dans le cadre de production multi-sites,
- identifier la solution de conception par instanciation de la nomenclature générique.

Nous proposons par la suite d'étudier l'influence des éléments suivants :

- la variation de la demande et son impact sur la localisation de sites,
- le niveau de diversité des produits et l'effet du suréquipement de produits,
- la combinatoire de la nomenclature générique et l'intérêt de la résolution mixte du problème de recherche de solution de conception et de dimensionnement de chaîne logistique.

### 6.4.2. Problème de localisation et d'allocation

Nous cherchons maintenant à montrer l'impact de la variation de la demande d'un site client sur la localisation des sites et sur l'allocation de produits aux sites (sensibilité de la solution optimale à cette variation). Pour cela, nous avons mené plusieurs expérimentations.

Pour la première expérimentation, nous avons considéré que le site client du Brésil ne sera pas en activité avant la fin de l'horizon de planification, c'est-à-dire que sa demande est nulle sur toutes les périodes. La résolution du modèle montre que la variation de la demande de ce client n'influe pas sur la structure du sous-réseau logistique Europe, ni sur ses capacités dimensionnées, et que les deux sites (site avancé et site de fabrication de calculateurs) situés au Brésil ne seront pas

ouverts. Ceci conduit à la conclusion logique que la décision d'implantation au Brésil est dépendante uniquement de l'implantation du client du Brésil.

Pour la seconde expérimentation, nous avons supposé que, pour des raisons de coûts de main-d'œuvre élevés en Espagne, le client constructeur décide de délocaliser toute l'activité d'assemblage de voitures d'Espagne en Turquie. La solution obtenue montre d'une part la fermeture du site avancé Espagne, et d'autre part la fermeture du site de fabrication de modules du Portugal (dédié à ce dernier site avancé). Par contre, la capacité de production de modules et d'assemblage final du site avancé de Turquie est multipliée par trois. La capacité du site de Lituanie voit également sa capacité de production augmenter pour compléter celle du site de Turquie. La structure du reste du réseau reste inchangée.

Enfin, nous avons mené une troisième expérimentation consistant à diminuer progressivement la demande du site client France-Nord sur les huit périodes depuis les valeurs initiales données par le Tableau 6.1 jusqu'à une demande nulle. Les résultats obtenus montrent une réduction successive du réseau par la fermeture de certains sites de production et/ou la réduction de leurs capacités. Par exemple, le site de production de modules situé en Pologne n'apparaît que quand la demande moyenne par période sur le site France-Nord excède 10 000. Au-delà de 10 000, la capacité de production dimensionnée du site Pologne augmente avec la demande.

### 6.4.3. Problème de suréquipement

L'étude de l'influence des coûts fixes liés à l'existence des références sur le suréquipement nous paraît intéressante. Dans ces expérimentations, nous quantifions la diversité d'une solution par le nombre de packs qu'elle comporte. Par exemple, la solution optimale obtenue précédemment a une diversité de 3 (la demande est satisfaite avec les packs  $P2$ ,  $P3$ , et  $P4$ ). Nous cherchons maintenant à montrer l'impact des coûts fixes d'existence des références sur la diversité des solutions.

Pour cela, nous supposons que toutes les références de la nomenclature générique ont un même coût fixe  $CF$  d'existence. Le Tableau 6.5 donne pour différents coûts fixes d'existence la diversité des solutions obtenues (nombre de packs). Le coût fixe  $CF$  considéré pour notre problème initial est défini comme l'unité coût, selon les expérimentations, le coût fixe est un multiple du coût fixe initial (facteur variant de 0 à 150).

Coût fixe d'existence de référence (x CF)	150	120	110	80	50	10	1	0,1	0,01	0
Diversité solution (nombre de packs)	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4

Tableau 6.5 – Diversité des solutions en fonction du coût fixe d'existence des références

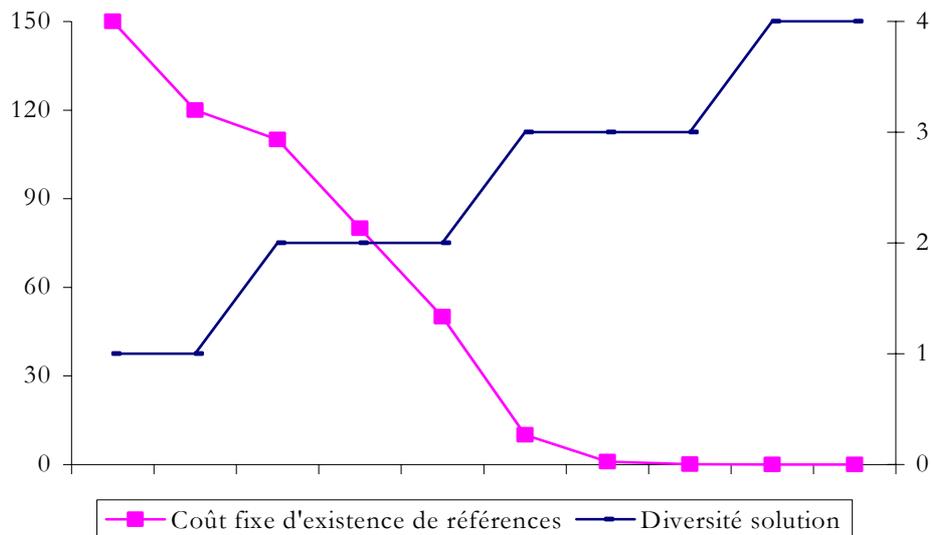


Figure 6.6 – Diversité des solutions produit en fonction du coût d'existence de référence.

La courbe de la Figure 6.6, représentant le Tableau 6.5, montre que la diversité des solutions augmente (de 1 à 4) avec la diminution du coût fixe (150.CF à 0). Pour notre application, nous disposons uniquement de quatre segments de demande, donc de quatre packs, et en conséquence d'une diversité maximum de quatre. Une segmentation plus affinée de la demande autoriserait une plage de variation de la diversité plus grande.

#### 6.4.4. Intérêt du problème mixte

Pour étudier l'impact de la combinatoire de la nomenclature générique sur le temps de calcul, la résolution a été réalisée pour des nomenclatures génériques simplifiées. Ces nomenclatures simplifiées conservent la même solution optimale et sont obtenues en imposant certains choix. A chaque fois que nous imposons un choix à la nomenclature générique initiale, nous réduisons l'espace des solutions.

Dans cette expérience, nous relevons le temps nécessaire à la recherche de la solution optimale en fonction de la combinatoire de la nomenclature générique ou taille de l'espace de solution : nombre de solutions réalisables que recouvre la nomenclature générique.

Le Tableau 6.6 reporte les temps de calcul pour des nomenclatures génériques ayant des combinaisons différentes. La première nomenclature (combinatoire = 1) correspond à la solution optimale et la dernière nomenclature (combinatoire = 48) représente la nomenclature générique initiale.

Combinatoire	1	2	4	12	18	24	32	36	48
Temps de calcul (sec.)	115,47	177,06	249,45	302,32	398,15	407,25	434,45	482,35	744,77

Tableau 6.6 – Temps de calcul en fonction de la combinatoire de la nomenclature

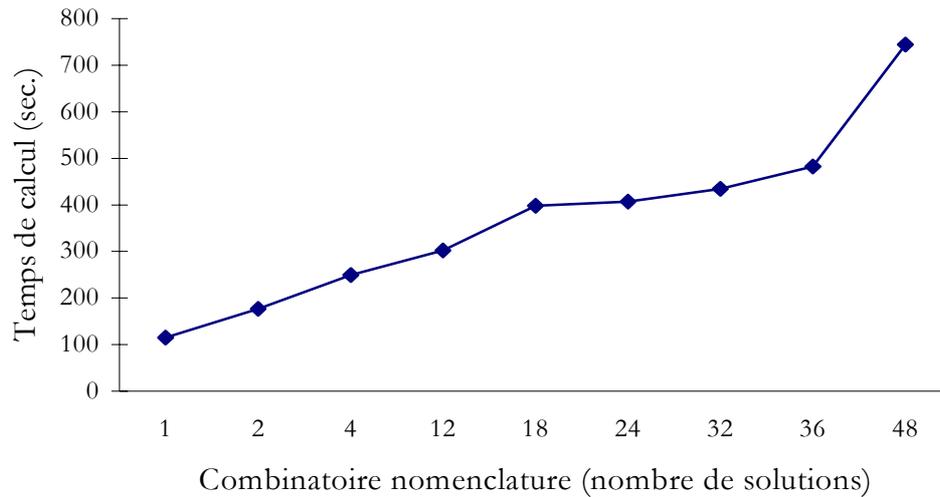


Figure 6.7 – Sensibilité du modèle à la combinatoire de la nomenclature

La courbe de la Figure 6.7, représentant le Tableau 6.6, montre d’abord la sensibilité du modèle à la combinatoire de la nomenclature. Elle montre que le temps de calcul augmente avec la combinatoire de la nomenclature. Ce résultat est prévisible du fait de l’augmentation du nombre de variables et de contraintes, particulièrement les variables entières d’existence d’articles et de liens de nomenclature.

Cette courbe montre également qu’il est intéressant de résoudre une fois le modèle avec nomenclature générique (744,77 sec.) plutôt que 48 fois le modèle classique de dimensionnement de chaîne logistique (environ 48 x 115,47 sec.).

Toutefois, la durée du calcul avec une combinatoire de 1 (pas de choix de solution de conception) souligne aussi la difficulté à résoudre seul le dimensionnement du réseau logistique (115,47 sec.).

## 6.5. Conclusions et extensions

La modélisation proposée pour la résolution simultanée du problème de choix de solution de conception et du dimensionnement de chaîne logistique a été validée sur une application réelle.

La généralité du modèle a été utilisée dans l’exemple : le réseau modélisé est multi-sites de production, multi-articles et multi-périodes, et le produit correspond à une nomenclature générique définie par des articles physiques et logiques et des liens *ET* et *OU*. L’exemple reste par contre de taille modeste quant au nombre de packs considérés. Les expérimentations montrent que la plupart des problèmes sur huit périodes, correspondant à une planification pour deux années, sont résolus en moins de 20 minutes.

Des travaux sur le dimensionnement de chaîne logistique [Goetschalckx *et al.*, 1994] [Martel *et al.*, 2001] ont montré que la formulation du problème a un impact considérable sur les temps de calcul. Pour améliorer ces temps de calcul, il est intéressant d’ajouter à la formulation initiale des coupes efficaces, par exemple sous forme de contraintes permettant de lier plus directement la demande aux variables binaires.

La croissance exponentielle des temps de calcul restera néanmoins toujours une difficulté. La combinatoire du dimensionnement du réseau logistique et celle de la nomenclature générique

font croître exponentiellement le temps de calcul. Pour le limiter, il est important de ne pas modéliser des possibilités industriellement inacceptables.

Tous ces travaux se situent dans une démarche de conception à un niveau stratégique. A ce niveau, on considère des données macroscopiques : sites de production, macro-nomenclatures, centre de charge goulot. Un résultat significatif peut être obtenu avec un volume de données réduit. Aussi, de très nombreux problèmes industriels doivent pouvoir se modéliser et se résoudre avec l'approche proposée.

# Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse a comme cadre la mise en œuvre d'une approche de concurrent engineering. Cette approche vise à définir simultanément un produit et sa chaîne logistique lorsque la demande présente une diversité élevée.

La conduite parallèle et fortement interactive des deux processus de conception de produit et de dimensionnement de chaîne logistique constitue un apport pour la maîtrise de trois niveaux de diversité :

- la diversité fonctionnelle issue de l'évolution de la demande vers des besoins client de plus en plus individualisés,
- la diversité technique caractérisée par le nombre de produits ou composants capables de satisfaire la diversité fonctionnelle. Elle est issue de la multiplicité des principes de conception et des nomenclatures de produits possibles,
- la diversité procédé identifiée par l'ensemble des processus industriels capables de réaliser les produits et composants. La chaîne logistique, offrant de nombreuses possibilités de répartir les activités industrielles à l'échelle mondiale, constitue une des sources principales de cette diversité.

Notre proposition de réponse avec une approche concurrent engineering s'articule autour de deux apports. Le premier, dans le domaine d'aide à la conception de produits, vise à définir rapidement des solutions de conception de produit permettant d'une part, de satisfaire au mieux la diversité fonctionnelle du besoin et d'autre part, de limiter la diversité technique. La contribution dans le domaine de conception de chaîne logistique constitue notre second apport. Nous avons proposé une approche de dimensionnement de chaîne logistique capable d'optimiser à la fois la diversité procédé et la diversité technique issue du processus de conception de produits.

## Apport en conception de produits

Dans le premier chapitre, nous avons développé une démarche de conception de produits à forte diversité. Notre démarche est cohérente par rapport à l'existant en bibliographie. C'est une démarche de conception routinière mettant en œuvre plusieurs phases successives allant du cahier des charges exprimant le besoin à la génération de la nomenclature de production. Dans cette démarche, la définition du produit est progressivement détaillée au cours de la définition fonctionnelle, de la définition technologique, de la définition géométrique pour aboutir à la phase de décomposition en modules.

Le caractère routinier des problèmes de conception abordés offre la possibilité de capitaliser les connaissances mises en œuvre en conception. Nous avons alors proposé dans le deuxième chapitre des outils d'assistance à notre démarche exploitant des modèles génériques. Ces modèles sont capables de représenter les connaissances relatives au produit et au déroulement des différentes phases de la démarche. Ils permettent de réutiliser les connaissances modélisées et de réduire en conséquence erreurs, délais et coûts de conception. Pour prendre en compte la diversité fonctionnelle et technique, nous avons proposé des modèles à base de contraintes

représentés sous la forme de CSP conditionnels. Sur les aspects géométriques, le formalisme CSP conditionnel s'est révélé difficile à mettre en œuvre.

Cette démarche et ses outils d'assistance ont été déclinés sur une problématique de conception de câblage électrique automobile. Sur un champ industriel peu abordé dans la littérature, la plupart des travaux scientifiques du domaine traitant de conception mécanique, cette application montre clairement l'importance des problèmes liés aux différentes formes de diversité et l'applicabilité de la démarche et des outils proposés.

### **Apport en conception de chaînes logistiques**

Pour chaque segmentation de la demande, la démarche de conception de produit vue ci-dessus propose un ensemble des nomenclatures possibles du produit. La deuxième partie vise à sélectionner un nombre limité de nomenclatures pour couvrir au mieux la demande et minimiser un coût total.

Le troisième chapitre a introduit la notion de nomenclature générique pour représenter l'ensemble des nomenclatures proposées ainsi que la segmentation de la demande. Une première résolution exploitant des coûts fixes et des coûts variables par produit a été proposée. Cette résolution a permis d'introduire le problème sans prendre en compte la diversité procédé.

Afin de prendre en compte cette diversité procédé, nous avons développé un modèle linéaire à variables entières intégrant la nomenclature générique et une représentation générique du réseau logistique. L'apport majeur de ce modèle est lié d'une part, à l'existence d'articles logiques et physiques, de composition d'articles en *ET* et en *OU* permettant de représenter les diversités technique et fonctionnelle ; et d'autre part, à leur intégration dans les équations de conservation du flux. Ce modèle permet ainsi de définir simultanément une famille de produits et la chaîne logistique qui la fournira en minimisant un coût total.

L'application industrielle développée a montré que le modèle peut être résolu en un temps raisonnable sur un solveur commercial. Les expérimentations réalisées ont montré l'impact de la demande et des coûts d'existence de produits sur le dimensionnement de la chaîne logistique et sur le choix des nomenclatures à produire.

### **Apport pour le concurrent engineering**

L'ensemble de ces deux apports constitue bien une avancée dans le domaine du concurrent engineering dans la mesure où les étapes de conception de produits et de chaînes logistiques peuvent être menées avec une interactivité forte : le modèle de conception de la partie II exploitant les degrés de liberté fournis par la démarche décrite en partie I.

### **Perspectives**

En conception produit :

La décomposition du produit, dernière phase de la démarche de conception proposée, est réalisée a priori. Il serait intéressant d'intégrer des contraintes liées aux procédés logistiques (manutention, transport, assemblage, fabrication) dans les critères de décomposition.

Nous avons souligné que les approches par contraintes ne se prêtaient pas aisément aux problèmes de définition géométrique des produits mais permettent de supporter les différentes formes de diversité. Les outils de CAO supportant parfaitement les problèmes de définition géométrique, le couplage approche par contraintes et outil de CAO doit être exploré pour arriver à supporter l'ensemble de la démarche proposée.

La démarche et les outils proposés ont été expérimentés sur une problématique de câblage automobile, il sera important de les tester sur d'autres formes de problèmes de conception à forte diversité.

En conception de chaîne logistique :

Le modèle développé présente quelques limitations par rapport aux hypothèses effectuées concernant le réseau logistique. Les effets d'échelle liés à la massification des flux, les choix de positionnement de stock de sécurité et la saisonnalité sur l'ouverture des sites ou des lignes de fabrication n'ont notamment pas été intégrés.

De nombreux modèles de dimensionnement de chaîne logistique font apparaître l'intérêt d'introduire des coupes pour accélérer la résolution indépendamment de la méthode de résolution choisie. Ces coupes utilisent généralement le fait que la demande est affectée a priori aux produits pour contraindre le volume global de moyens de production à ouvrir. Une des caractéristiques de la nomenclature générique est que la demande n'est pas a priori affectée aux articles. De ce fait, l'extension des coupes classiques nécessite d'être étudiée.

Globalement et à plus long terme :

On remarquera que les modèles développés pour gérer les différentes formes de diversité exploitent des approches par contraintes. Nous avons toutefois séparé la résolution en deux activités de conception à conduire de manière itérative. Pour aller plus loin dans l'intégration visée par le concurrent engineering, il faudrait développer un modèle unique intégrant toutes les variables et les contraintes de conception de produit et de chaîne logistique.



# Bibliographie

## A.

---

- [Aamodt et Plaza, 1994] A. Aamodt, E. Plaza, Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations and System Approaches, *AI Communications*, Vol. 7(1), pp. 39-59, 1994.
- [Agard et Tollenaere, 2002a] B. Agard, M. Tollenaere, Design of wire harnesses for mass customization, *IDMME'02*, Clermont-Ferrand, France, Mai 2002.
- [Agard et Tollenaere, 2002b] B. Agard, M. Tollenaere, Conception d'assemblages pour la customisation de masse, *Mécanique et Industrie*, Vol. 3, pp. 113-119, 2002.
- [Agard, 2002] B. Agard, Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité, *Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble*, 2002.
- [Aikens, 1985] C.H. Aikens, Facility location models for distribution planning, *European Journal of Operational Research*, Vol. 22(3), pp. 263-279, 1985.
- [Aldanondo *et al.*, 1997] M. Aldanondo, P. Clermont, L. Geneste, Aide à la production de brut en production manufacturière à demande fluctuante, *MOSIM'97*, Rouen, France, Juin 1997.
- [Aldanondo *et al.*, 2000] M. Aldanondo, G. Moynard, K. Hadj-Hamou, General configurator requirements and modeling elements, *ECAI Workshop on Configuration*, Berlin, Germany, 2000.
- [Aldanondo *et al.*, 2001] M. Aldanondo, J. Lamothe, K. Hadj-Hamou, Configurator and CAD modeler: gathering the best of two worlds, *IJCAI Workshop on Configuration*, Seattle, USA, 2001.
- [Aldanondo *et al.*, 2003] M. Aldanondo, K. Hadj-Hamou, G. Moynard, J. Lamothe, Product generic modeling for configuration: requirement analysis and modeling elements, soumis à *Journal Européen des Systèmes Automatisés JESA*.
- [Aldanondo *et al.*, 2002] M. Aldanondo, K. Hadj-Hamou, J. Lamothe, Mass Customization Configuration and Manufacturing, *International Seminar on Manufacturing Systems CIRP*, Seoul, Korea, May 2002.
- [Andreasen, 1991] M.M. Andreasen, The theory of domains, *Workshop on understanding function and function to form evolution*, Cambridge University, UK, 1991.
- [Arntzen *et al.*, 1995] B.C. Arntzen, G. Brown, T.P. Harrison, L. Trafton, Global supply chain management at digital equipment corporation, *Interfaces*, Vol. 25(1), pp. 69-93, 1995.

**B.**

- [Ballou et Masters, 1993] R.H. Ballou, J.M. Masters, Commercial software for locating warehouses and other facilities, *Journal of Business Logistics*, Vol. 14(2), pp. 71-107, 1993.
- [Ballou, 1992] R. H. Ballou, *Business Logistics Management*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, Third Edition, 1992.
- [Bel et al., 1996] G. Bel, K. Rota, C. Thierry, Constraint optimization as a tool for business process re-engineering, *International Workshop on Modelling Techniques, Business Process et Benchmarking*, Bordeaux, Avril, 1996.
- [Belloy, 1994] P. Belloy, Intégration de connaissances métier dans la conception : un modèle pour les pièces mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage, *Thèse Université Joseph Fourier - Grenoble 1*, France, 1994.
- [Benders, 1962] J.F. Benders, Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems, *Numerische Mathematik*, 1962
- [Bernard, 2000] A. Bernard, Modèles et approches pour la conception et la production intégrées, *Revue APII-JESA*, Vol. 34, pp. 163-193, 2000
- [Blanco, 1999] E. Blanco, L'émergence du produit dans la conception distribuée, vers de nouveaux modes de rationalisation dans la conception de systèmes mécaniques, *Thèse Université Joseph Fourier*, France, 1999.
- [Boudouh, 2000] T. Boudouh, Modélisation et évaluation d'organisations industrielles en ingénierie simultanée. Approche méthodologique pour la mise en œuvre de solutions de conception intégrée, *Thèse Université de Bordeaux I*, France, 2000.
- [Braha et Maimon, 1997] D. Braha, O. Maimon, The design process: properties, paradigms, and structure, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 27(3), pp. 146-166, 1997.
- [Brown et al., 1987] G.G. Brown, G.W. Graves, M.D. Honczarenko, Design and operation of a multicommodity production/distribution system using primal goal decomposition, *Management Science*, Vol. 33(11), pp. 1469-1480, 1987.
- [Brown et Chandrasekaran, 1989] D. C. Brown, B. Chandrasekaran, Design problem solving: knowledge structures and control strategies, Research Notes, *Artificial Intelligence Series*, Pitman Publishing, Ltd., London, England, 1989.
- [Brown, 1998a] D.C. Brown, Intelligent Computer Aided-Design, Encyclopedia of Computer Science and Technology, ed. Williams and Sochats, 1998.
- [Brown, 1998b] D.C. Brown, Defining Configuring, Artificial Intelligent for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Special Issue: Configuration Design, Vol. 12(4), pp. 301-306, 1998.

---

**C.**

---

- [Cerezuela *et al.*, 1995] C. Cerezuela, A. Cauvin, J.P. Kieffer, Concurrent Engineering: the use of scheduling methods in order to optimize the design of cable harnesses in electrical complex systems, *8th Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, China, 1995.
- [Cerezuela *et al.*, 1998] C. Cerezuela, D. Riopel, L. Villeneuve, L'ingénierie concurrente dans les entreprises québécoises, *Le Journal Industriel du Québec* 14, 1998.
- [Cerezuela, 1996] C. Cerezuela, Contribution à l'élaboration de méthodes et d'outils d'aide à la conception et à la fabrication dans une perspective d'ingénierie concurrente. Le cas du câblage électrique, *Thèse Université Aix-Marseille III*, France, 1996.
- [Chandrasekaran, 1990] B. Chandrasekaran, Design Problem Solving: A Task Analysis, *AI Magazine*, Vol. 11(4), pp. 59-71, 1990.
- [Clermont, 1998] P. Clermont, Apport de réactivité dans le cycle de développement du produit : formalisation d'une démarche, *Thèse Université de Bordeaux*, France, 1998.
- [Cohen et Kleindorfer, 1993] M.A. Cohen, P.R. Kleindorfer, Creating value through operations: the legacy of Elwood S. Buffa, in R.K. Sarin ed., *Perspectives in Operations Management*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 3-21, 1993.
- [Cohen et Lee, 1985] M.A. Cohen, H.L. Lee, Manufacturing strategy: concepts and methods, in P.R. Kleindorfer ed., *The Management of Productivity and Technology in Manufacturing*, Plenum, New York, 1985.
- [Cohen et Lee, 1988] M.A. Cohen, H.L. Lee, Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods, *Operations Research*, Vol. 36(2), pp. 216-228, 1988.
- [Cohen et Lee, 1989] M.A. Cohen, H.L. Lee, Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks, *Journal of Manufacturing and Operations Management*, Vol. 2, pp. 81-104, 1989.
- [Cole, 1995] M.H. Cole, Service considerations and the design of strategic distribution systems, *Ph.D thesis, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology*, Atlanta, 1995.
- [Constant, 1996] D. Constant, Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques, *Thèse Université Joseph Fourier - Grenoble I*, France, 1996.

---

**D.**

---

- [Davis, 1992] E.W. Davis, Global Outsourcing: have U.S. managers thrown the baby out with the bath water ?, *Business Horizons*, pp. 58-65, 1992.
- [Dechter, 1988] R. Dechter, A. Dechter, Belief Maintenance in dynamic constraint networks, In *Proceedings of AAAI'88*, St. Paul, Minnesota, 1988.

- [Dejax, 2001] P. Dejax, Organisation et Implantation du Système Logistique, et Gestion de la Distribution, La Maîtrise des Flux, coordinateur : J.-P. Campagne, Editions Hermès, 2001.
- [Dixon *et al.*, 1988] J.R. Dixon, M.R. Duffey, R.K. Irani, K.L. Meunier, M.F. Orelup, A proposed taxonomy of mechanical design problems, Proceedings of the ASME Computers in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, San Francisco, 1988.
- [Dixon, 1988] J.R. Dixon, Designing with features: building manufacturing knowledge into more intelligent CAD systems, ASME Manufacturing International Conference, Atlanta, 1988.
- [Dogan et Goetschalckx, 1999] K. Dogan, M. Goetschalckx, A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems, Research Report, IIE Transactions, Vol. 31(11), pp. 1027-1036, 1999.
- [Dowlatshahi, 1992] S. Dowlatshahi, Product design in a Concurrent Engineering environment: an optimization approach, International Journal of Production Research, Vol. 30(8), pp. 1803-1818, 1992.
- [Dowlatshahi, 1994] S. Dowlatshahi, A morphological approach to product design in a Concurrent Engineering environment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 9, pp. 324-332, 1994.
- [Dufrière, 1991] L. Dufrière, Contribution à une méthodologie de conception des systèmes d'assemblage pour les familles de produits, *Thèse Université Franche-Comté*, France, 1991.
- [Dupinet, 1991] E. Dupinet, Contribution à l'étude d'un système informatique d'aide à la conception de produits mécaniques par la prise en compte des relations fonctionnelles, *Thèse Ecole Centrale de Paris*, France, 1991.
- [Dupont *et al.*, 1999] L. Dupont, M. Erol, G. Cormier, N. Turkkan, La standardisation des composantes : modèles et algorithmes, *3ème congrès international de Génie industriel*, Montréal, Mai 1999.

---

**E.**

---

- [Erixon, 1996] G. Erixon, *Design for Modularity, Design for X: concurrent engineering imperatives*, Huang G.Q. ed., Chapman & Hall, pp. 356-379, 1996.
- [Erol, 1999] M. Erol, Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique, *Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble*, France, 1999.
- [Eynard, 1999] B. Eynard, Modélisation du produit et des activités de conception – Contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie, *Thèse Université Bordeaux 1*, France, 1999.

---

**F.**

---

- [Freuder, 1978] E.C. Freuder, Synthesizing constraint expressions, *Communications of the ACM*, Vol. 21, pp. 958-966, 1978.
- [Friedrich et Stumptner, 1999] G. Friedrich, M. Stumptner, Consistency-Based Configuration, *AAAI Workshop on Configuration*, Orlando, Florida, 1999.

---

**G.**

---

- [Geoffrion *et al.*, 1978] A.M. Geoffrion, G.W. Graves, S.J. Lee, Strategic distribution system planning: a status report, in *A.C. Hax ed., Studies in Operations Management*, North-Holland, Amsterdam, pp. 179-204, 1978.
- [Geoffrion *et al.*, 1982] A.M. Geoffrion, G.W. Graves, S.J. Lee, A management support system for distribution planning, *INFOR*, Vol. 20(4), pp. 287-314, 1982.
- [Geoffrion et Graves, 1974] A.M. Geoffrion, G.W. Graves, Multicommodity distribution system design by Benders decomposition, *Management Science*, Vol. 20(5), pp. 822-844, 1974.
- [Geoffrion et Powers, 1995] A. Geoffrion, R. Powers, Twenty years of strategic distribution system design: an evolutionary perspective, *Interfaces*, Vol. 25, pp. 105-128, 1995.
- [Gero, 1989] J.S. Gero, *Artificial Intelligence in design*, Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, Southampton, UK, 1989.
- [Gero, 2001] J.S. Gero, Mass customisation of creative designs, *International Conference on Engineering Design ICED'01*, Glasgow, 2001.
- [Goetschalckx *et al.*, 1994] M. Goetschalckx, G. Nemhauser, M.H. Cole, R.P. Wei, K. Dogan, X. Zhang, Computer aided design of industrial logistics systems, *TRIennial Symposium on Transportation Analysis TRISTAN II*, Capri, Italie, June 1994.
- [Goetschalckx *et al.*, 2001] M. Goetschalckx, S. Ahmed, A. Shapiro, T. Santoso, Designing flexible and robust supply chains, *International Conference on Industrial Engineering and Production Management IEPM*, Quebec City, Canada, August 2001.
- [Goetschalckx, 2000] M. Goetschalckx, *Strategic Network Planning, in Supply chain management and advanced planning*, H. Stadler et C. Kilger ed., Springer, Heidelberg, Germany, 2000.
- [Guéna, 1992] F. Guéna, Réutilisation de solutions génériques pour résoudre des problèmes de conception, *Thèse Institut Blaise Pascal, Paris VI*, France, 1992.

---

**H.**

---

- [Hadj-Hamou *et al.*, 2001a] K. Hadj-Hamou, M. Aldanondo, J. Lamothe, E. Caillaud, Aide à la conception de produits : approche assistée par la configuration, *4<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel*, Aix-Marseille, Juin 2001.

- [Hadj-Hamou *et al.*, 2001b] K. Hadj-Hamou, E. Caillaud, J. Lamothe, M. Aldanondo, Knowledge for product configuration, *International Conference on Engineering Design ICED'01*, Glasgow, Scotland, 2001.
- [Harani, 1997] Y. Harani, Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception, *Thèse Institut National Polytechnique Grenoble*, France, 1997.
- [Hodder et Dincer, 1986] J.E. Hodder, M.C. Dincer, A multifactor model for international plant location and financing under uncertainty, *Computers and Operations Research*, Vol. 13(5), pp. 601-609, 1986.
- [Huang et Kusiak, 1998] C.C. Huang, A. Kusiak, Modularity in design of products, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 28(1), pp. 66-77, 1998.
- [Huang, 1996] G.Q. Huang, *Design for X: concurrent engineering imperatives*, Chapman et Hall, 1996.

---

**J.**

- [Janssen, 1990] P. Janssen, Aide à la conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes, *Thèse Université de Montpellier*, France, 1990.
- [Jegou, 1991] Jegou, Contribution à l'étude des problèmes de satisfaction de contraintes : algorithmes de propagation et de résolution. Propagation de contraintes dans les réseaux dynamiques, *Thèse Université de Montpellier II*, France, 1991.
- [Jiao et Tseng, 1999] J. Jiao, M. Tseng, A methodology of developing product family architecture for mass customization, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 10, pp. 3-20, 1999.

---

**K.**

- [Kolodner, 1993] J. Kolodner, *Case-Based Reasoning*, Morgan Kaufmann Publishers, CA, 1993.
- [Kota et Ward, 1991] S. Kota, A.C. Ward, Functions, structures and constraints, in *Conceptual Design*, ed. A.C. Ward, University of Michigan, 1991.
- [Kusiak et Wang, 1991] A. Kusiak, J. Wang, Concurrent Engineering: Simplification of the design process, *CAPE'91, Integration Aspects*, Bordeaux, 1991
- [Kusiak, 1999] A. Kusiak, *Engineering design: Products, Processes, and Systems*, Academic Press, San Diego, California, 1999.

---

**L.**

- [Lamothe et Aldanondo, 2001] J. Lamothe, M. Aldanondo, Une approche d'ingénierie intégrée pour la logistique : intérêts et limites de la coopération, *MOSIM 2001*, Troyes France, 2001.

- [Lenguin, 1996] C. Lenguin, Spécification pour un langage de représentation du processus de conception en génie mécanique, *Mémoire de DEA de Production Automatisée*, ENS Cachan, Université Nancy I, 1996
- [Lawson et Karandikar, 1994] M. Lawson, H. Karandikar, A survey of Concurrent Engineering, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 2, pp. 01-06, 1994.
- [Lee et al., 1993] H.L. Lee, C. Billington, B. Carter, HP gains control of inventory and service through design for localization, *Interfaces*, Vol. 23(4), pp. 1-11, 1993.
- [Lee et Billington, 1992] H.L. Lee, C. Billington, Managing supply chain inventory: Pitfalls and opportunities, *Sloan Management Review*, Vol. 33 (3), pp. 65-73, 1992.
- [Lee et Billington, 1993] H.L. Lee, C. Billington, Material management in decentralized supply chain, *Operations Research*, Vol. 41(5), pp. 835-847, 1993.
- [Lee et Billington, 1994] H.L. Lee, C. Billington, Designing products and processes for postponement, Management of design: engineering and management perspectives, *Dasu S. and Eastman C. Edts, Kluwer Academic Publishers*, Boston, pp. 105-122, 1994.
- [Lee et Billington, 1995] H.L. Lee, C. Billington, The evolution of supply chain management models and practice at Hewlet-Packard, *Interfaces*, Vol. 25, pp. 42-63, 1995.
- [Lee et Tang, 1998] H.L. Lee, C.S. Tang, Variability reduction through operations reversal, *Management Science*, Vol. 44(2), pp. 162-172, 1998.
- [Lévine et Pomerol, 1989] P. Lévine, J.C. Pomerol, *Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts*, Hermès, Paris, 1989.
- [Lhomme, 1993] O. Lhomme, Consistency techniques for numerical CSPs, In *Proceedings of IJCAI'93*, Chambéry, France, 1993.
- [Lucas et al., 1999] C.A. Lucas, G. Mitra, S. Mirhassani, Supply chain planning under uncertainty, Quick Response in the Supply Chain, *Edited by E. Hadjiconstantinou*, Springer, 1999.

## M.

---

- [Mackworth, 1977] A.K. Mackworth, Consistency in Networks of Relations, *Artificial Intelligence*, Vol. 8, pp. 99-118, 1977.
- [Maher et al., 1995] M.L. Maher, M.B. Balachandran, D.M. Zhang, Case-Based Reasoning in design, *Lawrence Erlbaum Assoc.*, 1995.
- [Maher et Gero, 1990] M.L. Maher, J.S. Gero, AI Magazine, *Special issue on AI based design systems*, *AAAI*, Vol. 11(4), 1990.
- [Maher, 1998] M.L. Maher, CBR as a framework for design, *Proceedings of AAAI Workshop on Case-Based Reasoning Integrations*, Madison, Wisconsin, 1998.

- [Mannisto *et al.*, 1996] T. Mannisto, H. Peltonen, R. Sulonen, View to Product Configuration Knowledge Modeling and Evolution, *Workshop on configuration, AAAI Press*, 1996.
- [Martel *et al.*, 2001] A. Martel, M. Paquet, G. Desaulniers, Including Technology selection decisions in manufacturing network design models, *International Conference on Industrial Engineering and Production Management IEPM*, Quebec City, Canada, August 2001.
- [Martel et Vankatadri, 1999] A. Martel, U. Vankatadri, Optimizing Supply Network Structures under Economies of Scale, *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, Glasgow, UK, 1999.
- [Martel, 2001] A. Martel, Un modèle général pour l'optimisation de réseaux logistiques, 4<sup>ème</sup> *Congrès International de Génie Industriel*, Aix-Marseille, Juin 2001.
- [Masters et Pohlen, 1994] J.M. Masters, T.L Pohlen, *Evolution of the Logistics Profession*, Logistics Handbook, ed. Roberson, Capacino et Howe Free Press: New York, 1994.
- [Maurino, 1995] M. Maurino, *La gestion des données techniques, technologie du concurrent engineering*, Ed. Masson, Collection: Organisation Industrielle, 1995.
- [Menand et Tollenaere, 2001] S. Menand, M. Tollenaere, MULTI - a tool and a method to support collaborative functional design, *International Conference on Engineering Design ICED'01*, Glasgow, Scotland, 2001.
- [Menand, 2002] S. Menand, Modélisation pour la réutilisation du processus de conception multi acteurs de produits industriels, *Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble*, France, 2002.
- [Mittal et Falkenhainer, 1990] S. Mittal, B. Falkenhainer, Dynamic Constraint Satisfaction Problems, *Proceedings of the Ninth National Conference on AI, AAAI*, 1990.
- [Mittal et Frayman, 1989] S. Mittal, F. Frayman, Towards a generic model of configuration tasks, *Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, Vol. 2, pp. 1395-1401, 1989.
- [Montanari et Rossi, 1989] H. Montanari, U. Rossi, *Fundamental properties of networks of constraints: a new formulation*, Springer-Verlag, 1989.
- [Montanari, 1974] H. Montanari, Networks of constraints: Fundamental properties and application to picture processing, *Information Sciences*, Vol. 7, pp. 95-132, 1974.
- [Mulyanto, 2000] T. Mulyanto, Conception, configuration et incertitude dans le cadre de la programmation par contraintes, 5<sup>èmes</sup> *Rencontres Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle*, Lyon, Septembre 2000.

---

**N.**

---

- [Narahari et Biswas, 2000] Y. Narahari, S. Biswas, Supply Chain Management: Modeling and Decision Making, Invited paper, *International Conference on Flexible Autonomous, Manufacturing Systems*, Coimbatore Institute of Technology, Coimbatore, January 2000.

---

**O.**

---

- [Ouazzani, 1999] A. Ouazzani, Représentation dynamique du processus de conception : une perspective de capitalisation de l'historique de conception, *Thèse Ecole Centrale de Paris, France*, 1999.

---

**P.**

---

- [Pahl et Beitz, 1996] G. Pahl, W. Beitz, *Engineering Design: a Systematic Approach*, Springer-Verlag, London, 2<sup>nd</sup> édition, 1996.
- [Prasad, 1996] B. Prasad, Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process development, V. 1, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [Price, 2000] C. Price, AutoSteve, Automated Electrical Design Analysis, *Europ. Conf. Artificial Intelligence*, Berlin, Germany, 2000.

---

**R.**

---

- [Regin *et al.*, 1998] J.C. Regin, W. Nuijten, C. Bessiere, C.L. Pape, F. Rossi, P.V. Beek, P.V. Hentenryck, Non binary constraints, *European Conference on Artificial Intelligence*, 1998.
- [Rota, 1995] K. Rota, Localisation robuste d'unités de production flexibles, *Rapport de DEA, ONERA-CERT*, 1995.
- [Rota, 1998] K. Rota, Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources. Application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique, *Thèse Ecole National Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace*, France, 1998.

---

**S.**

---

- [Sabin et Freuder, 1996] D. Sabin, E.C. Freuder, Configuration as Composite Constraint Satisfaction, *Proceedings of the Artificial Intelligent and Manufacturing Research Planning Workshop, AAAI Press*, 1996.
- [Sam-Haroud, 1995] D. Sam-Haroud, Constraint consistency techniques for continuous domains, *Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 1995.
- [Saucier, 1997] A. Saucier, Un modèle multi-vues du produit pour le développement et l'utilisation de systèmes d'aide à la conception en ingénierie mécanique, *Thèse Ecole Normale Supérieure de Cachan*, France, 1997.
- [Schiex et Verfaillie, 1993] T. Schiex, G. Verfaillie, Nogood recording for static and dynamic constraint satisfaction problems, *International Journal of Artificial Intelligence Tools*, Vol. 3, pp. 187-207, 1993.

- [Sellini, 1999] F. Sellini, Contribution à la représentation et à la vérification des modèles de connaissances en ingénierie d'ensembles mécaniques, *Thèse Ecole Centrale de Paris*, France, 1999.
- [Slats *et al.*, 1995] P.A. Slats, B. Bhola, J.J.M. Evers, G. Dijkhuizen, Logistics chain modelling, *European Journal of Operational Research*, Vol. 87, pp. 1-20, 1995.
- [SMECI, 1991] SMECI, *Manuel de l'utilisateur*, Version 1.5, ILOG, France, 1991.
- [Sohlenius, 1992] G. Sohlenius, Concurrent Engineering, *Annals of CIRP*, Vol. 41, pp. 645-655, 1992.
- [Soininen *et al.*, 1998] T. Soininen, J. Tiihonen, T. Mannisto, R. Sulonen, Towards a general ontology of configuration, *AIEDAM journal*, Vol. 12, pp. 357-372, 1998.
- [Soininen et Gelle, 1999] T. Soininen, E. Gelle, Dynamic Constraint Satisfaction in Configuration, *AAAI Workshop on Configuration*, Orlando, Florida, 1999.
- [Soininen, 1996] T. Soininen, Product configuration knowledge: case study and general model, *Master Thesis Faculty of Information Processing Science*, Helsinki, 1996.
- [Stadler, 2000] H. Stadler, Personal communication, Modelling features in two APS systems, 2000.
- [Subbu *et al.*, 1999] R. Subbu, A.C. Sanderson, C. Hocaoglu, R.J. Graves, Evolutionary decision support for distributed virtual design in modular product manufacturing, *Production Planning and Control*, Vol. 10(7), pp. 627-642, 1999.

## T.

---

- [Tarondeau, 1998] J.C. Tarondeau, *Stratégie Industrielle*, Ed. Vuibert, Collection : Gestion, 2<sup>nd</sup> édition, 1998.
- [Thierry *et al.*, 1993] C. Thierry, G. Bel, P. Esquirol, Multi-site scheduling: a constraint based approach, *International Conference on Industrial Engineering Management*, Mons, France, 1993.
- [Thierry, 1994] C. Thierry, Planification et ordonnancement multi-site : une approche par satisfaction de contraintes, *Thèse de l'ENSAE*, France, 1994.
- [Thomas et Griffin, 1996] D. Thomas, P.M. Griffin, Coordinated supply chain management: a review, *Working paper, School of Industrial and Systems Engineering*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1996.
- [Tichkiewitch *et al.*, 1995] S. Tichkiewitch, E. Chapa, P. Belloy, Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée, *Productivity in world without borders conference*, Montréal, 1995.
- [Tichkiewitch, 1996] S. Tichkiewitch, Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model, *Engineering System Design and Analysis Conference – ASME'96*, Montpellier, 1996.

- [Tollenaere et Constant, 1997] M. Tollenaere, D. Constant, Linking conceptual and embodiment design of mechanical systems, *International Conference on Engineering Design - ICED'97*, Tampere, 1997.
- [Tollenaere, 1992] M. Tollenaere, Quel modèle produit pour concevoir ? *Symposium Design and beyond, Tools and technologies*, Strasbourg, 2000.
- [Tollenaere, 1994] M. Tollenaere, Contribution à la modélisation de connaissances pour la conception mécanique, *Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier Grenoble I*, 1994.
- [Tollenaere, 1995] M. Tollenaere, Projet Shood, Modélisation objet pour la CFAO : modèle de conception, *Rapport de fin de contrat*, L3S, Grenoble, 1995.
- [Tollenaere, 1998] M. Tollenaere, *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, Hermès, Paris, 1998.

---

## U.

- [Umeda *et al.*, 1990] Y. Umeda, H. Takeda, T. Tomiyama, H. Yoshikawa, Function, behaviour and structure, *Applications of Artificial Intelligent in Engineering*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

---

## V.

- [Van Hoek et Weken, 1998] R.I. Van Hoek, H.A. Weken, The impact of modular production on the dynamics of supply chains, *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 9(2), pp. 35-50, 1998.
- [Van Roy, 1983] T. Van Roy, Cross decomposition for mixed integer programming, *Mathematical Programming*, Vol. 25, pp. 46-63, 1983.
- [Van Roy, 1986] T. Van Roy, Cross decomposition algorithm for capacity facility location, *Operations Research*, Vol. 34, pp. 145-163, 1986.
- [Vargas, 1995] C. Vargas, Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Application à la conception d'une culasse automobile. *Thèse de l'ENS Cachan*, France, 1995.
- [Véron et Aldanondo, 2000] M. Véron, M. Aldanondo, Yet Another Approach to CCSP for Configuration Problem, *ECAI Workshop on Configuration*, Berlin, August 2000.
- [Véron, 2001] M. Véron, Modélisation et résolution du problème de configuration industrielle : utilisation des techniques de satisfaction de contraintes, *Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse*, France, 2001.
- [Verter et Dincer, 1995] V. Verter, M.C. Dincer, Global manufacturing strategy, in Z. Drezner ed., *Facility Location: A survey of applications and methods*, Springer-Verlag, New York, pp. 263-282, 1995.

[Vidal et Goetschalckx, 1996] C.J. Vidal, M. Goetschalckx, The role and limitations of quantitative techniques in the strategic design of global logistics systems, *CIBER Research Report*, Georgia Institute of Technology, 1996.

[Vidal et Goetschalckx, 1998] C.J. Vidal, M. Goetschalckx, Strategic production distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models, *European Journal of Operational research*, Vol. 98, pp. 1-18, 1998.

[Vidal et Goetschalckx, 2000] C. J. Vidal, M. Goetschalckx, Modeling the effect of uncertainties on global logistics systems, *Journal of Business Logistics*, Vol. 21(1), pp. 95-120, 2000.

---

## W.

[Wielinga et Schreiber, 1997] B. Wielinga, G. Schreiber, Configuration design problem solving, *IEEE Intelligent Systems and their applications*, Vol. 12(2), pp. 49-56, 1997.

---

## Y.

[Yannou, 1998] B. Yannou, Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur, Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils, Hermès, Paris, 1998.

[Yoshikawa, 1988] H. Yoshikawa, Introduction to general design theory, *Intelligent Manufacturing Systems I*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 1988.

[Yvars, 2001] P.A. Yvars, Contribution à la représentation des connaissances en ingénierie intégrée de produits et de systèmes automatisés de production, *Habilitation à diriger des recherches*, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2001.

---



---

## **Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes.**

---

### ***Résumé***

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique, dans le cas où la demande présente une diversité élevée. Situés entre conception de produit et dimensionnement de chaîne logistique, ces travaux se placent fondamentalement dans le domaine de l'Ingénierie Intégrée ou du Concurrent Engineering. Avec la diversité croissante des produits, cette démarche est rendue nécessaire pour pouvoir concevoir le plus rapidement possible une famille de produits et leur chaîne logistique dans le but de minimiser le coût total de fonctionnement de la chaîne logistique.

La première partie de la thèse porte sur l'aide à la conception de produits. Elle présente une démarche multi-phases de préconception et de personnalisation des produits à forte diversité et des outils d'assistance à cette démarche de conception exploitant des modèles génériques à base de connaissances de type propagation et satisfaction des contraintes (modèles CSP). Le résultat de cette démarche est un ensemble de solutions de conception.

La seconde partie de la thèse porte sur la conception de réseaux logistiques. Elle présente une approche permettant de sélectionner les solutions produits et de dimensionner la chaîne logistique en s'appuyant sur un modèle de recherche opérationnelle de type programmation linéaire mixte en nombres entiers et dont l'objectif est de minimiser le coût de fonctionnement global de la chaîne logistique.

L'application industrielle visée, concernant la conception de systèmes de câblage pour l'industrie automobile est présentée, permettant d'illustrer la démarche proposée.

### ***Mots-clés***

Diversité de produit, Ingénierie Intégrée, Conception de produit, Dimensionnement de chaîne logistique, Programmation par contraintes, Optimisation linéaire en nombres entiers.

---

## **Contribution to the design of products with large diversity and their supply chain: a constraint based approach.**

---

### ***Abstract***

The works presented in this thesis deal with the simultaneous design of a product and its supply chain while facing a demand with a large diversity. Between product design and supply chain management, these works are closely related to the field of Integrated Engineering or Concurrent Engineering. With the growth of the product diversity, this simultaneous approach proves to be necessary to quickly design a product family and its supply chain in order to minimise the global operating cost of the supply chain.

The first part deals with the design of products. It presents a routine approach to design products with large diversity and some computer aided tools that rely on generic models and constraints satisfaction approach (CSP models). The result of this first step is a set of design solutions.

The second part deals with the design of supply chains. It presents an approach allowing to select a design solution and to specify the supply chain layout thanks to a mixed integer linear programming model. The model targets to optimise a global operating cost of the supply chain.

These works are relevant to an industrial problem of automotive wiring harness design.

### ***Keywords***

Product diversity, Concurrent Engineering, Product design, Supply chain design, Constraint programming, Mixed integer linear programming.