



HAL
open science

**Vers une optimisation de la chaîne logistique :
proposition de modèles conceptuels basés sur le PLM
(Product Lifecycle Management)**

Imane Bouhaddou

► **To cite this version:**

Imane Bouhaddou. Vers une optimisation de la chaîne logistique : proposition de modèles conceptuels basés sur le PLM (Product Lifecycle Management). Autre [cs.OH]. Université du Havre; Université Moulay Ismaïl (Meknès, Maroc), 2015. Français. NNT : 2015LEHA0026 . tel-01623542

HAL Id: tel-01623542

<https://theses.hal.science/tel-01623542>

Submitted on 25 Oct 2017

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 en cotutelle

Présentée pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT

Discipline : **Sciences de l'Ingénieur**

Spécialité : **Génie Industriel**

Par :

Imane BOUHADDOU

Titre :

Vers une optimisation de la chaîne logistique : Proposition de modèles conceptuels basés sur le PLM (Product Lifecycle Management)

Soutenue publiquement le 27 Février 2015

Jury :

Président :	Pr. Cyrille BERTELLE	(Université du Havre, France)
Rapporteurs :	Pr. Abdellah AIT OUAHMAN	(Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Marrakech, Maroc)
	Pr. Mounir BENAÏSSA	(Institut Supérieur de Gestion Industrielle, Université de Sfax, Tunisie)
	Pr. Abderrafiaa KOUKAM	(Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France)
Directeurs de thèse :	Pr. Abdellatif BENABDELHAFID	(Université du Havre, France)
	Pr. Youssef BENGHABRIT	(ENSAM - Meknès, Maroc)
Co-encadrante :	Pr. Latifa OUZIZI	(ENSAM - Meknès, Maroc)

*A la mémoire de ma mère,
Elle fut une grande dame et une femme exceptionnelle elle restera.*

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le professeur Abdellatif BENABDELHAFID. Son expérience, ses orientations, ses qualités pédagogiques et humaines m'ont permis de mener à bien cette thèse. Je le remercie de m'avoir accordé une entière confiance et surtout beaucoup d'autonomie.

Je ne saurais jamais comment exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, le professeur Youssef BENGHABRIT qui a toujours cru en moi. Je le remercie de m'avoir assuré les conditions nécessaires pour l'accomplissement de mon travail de thèse. Je le remercie également pour son soutien dans les moments difficiles.

J'adresse mes remerciements au professeur Latifa OUZIZI, co-encadrante de thèse, de m'avoir guidée et conseillée tout au long de mes travaux de recherche.

Je tiens à présenter mes vifs remerciements aux membres du jury :

Je remercie, tout d'abord, le professeur Cyrille BERTELLE d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Je remercie les professeurs Abderrafiaa KOUKAM, Abdellah AIT OUAHMAN et Mounir BENAÏSSA d'avoir accepté de rapporter ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail. Mes remerciements vont à mes collègues de l'ENSAM de Meknès et de l'Université du Havre que j'ai sollicités dans le cadre de mon travail de thèse, je les remercie pour la richesse des échanges que j'ai pu avoir avec eux.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à toute ma famille. J'adresse une pensée particulière à mon père, ma sœur Narjiss et mon frère Fahd qui m'ont toujours soutenue et qui ont eu toujours confiance en moi.

Un grand merci à mon mari de m'avoir aidée à surmonter les moments difficiles et les moments de doute. Je le remercie pour son soutien et ses encouragements durant ces années. Une tendre pensée pour mes enfants Mohamed Ali et Yasmine pour m'avoir donné la force d'aller au terme de ce travail.

Liste des abréviations

ABC	Activity Based Costing
AHP	Analytic Hierarchy Process
API	Application Programming Interface
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CIMOSA	Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture
DFL	Design For Logistics
DFSCM	Design For Supply Chain Management
DFX	Design For X
FST	Fuzzy Sets Theory
GERAM	Generalized Enterprise Reference Architecture
GMS	Grandes et Moyennes Surfaces
IDEF	Integration DEFinition
MCD	Modèle Conceptuel de Données
MOT	Modèle Organisationnel des Traitements
MRP	Material Requirement Planning
OPL	Optimization Programming Language
PDM	Product Data Management
PERA	Purdue Enterprise Reference Architecture
PLM	Product Lifecycle Management
PME	Petites et Moyennes Entreprises
SADT	Structured Analysis Design Technique
SART	Structured Analysis Real Time
SCM	Supply Chain Management
SCOR	Supply Chain Operations Reference
SMA	Système Multi-Agents
STEP	Standard for the Exchange of Product
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
UEML	Unified Enterprise Modelling Language
UML	Unified Modelling Language
XAO	X Assisté par Ordinateur

Liste des figures

Figure. 1 : Représentation synoptique de l'organisation de la thèse	6
Figure I.1 : Capacité d'action sur le projet	10
Figure I.2 : Deux approches différentes d'exécution des activités de conception	11
Figure I.3 : Phases du cycle de vie produit au marché	12
Figure I.4 : Modèle de référence STEP de cycle de vie du produit	13
Figure I.5 : Modèle de référence du GERAM pour le cycle de vie produit	13
Figure I.6 : Stratégie PLM centrée sur le produit	18
Figure I.7 : Partage des informations entre les membres de l'entreprise étendue	19
Figure I.8 : Principes du système PLM	20
Figure I.9 : Fonctionnalités du PLM	23
Figure I.10 : Représentation d'un réseau logistique	27
Figure I.11 : Description de la chaîne logistique par le modèle SCOR	29
Figure I.12 : Découpage traditionnel des flux de matière et d'information dans la chaîne	31
Figure I.13 : La nouvelle répartition des flux dans la chaîne logistique	31
Figure I.14 : Décisions relatives à la gestion de la chaîne logistique	33
Figure II.1 : File d'attente simple	43
Figure II.2 : Eléments de représentation d'un Réseau de Pétri	44
Figure II.3 : Formalisme de SADT	45
Figure II.4 : Cube CIMOSA	48
Figure II.5 : Les différents diagrammes d'UML	50
Figure II.6 : Modèle PLM proposé par Fathallah (2011)	56
Figure II.7 : Modèle Holonique	56
Figure II.8 : Spécifications de la classe «Produit»	58
Figure II.9 : Spécifications de la classe «Phase»	59
Figure II.10 : Spécifications de la classe «Acteur logistique »	60
Figure II.11 : Spécifications de la classe « Ressource »	61
Figure II.12 : Spécifications de la classe « Contrainte »	61
Figure II.13 : Spécification de la classe « Activité »	62
Figure II.14 : Modèle PLM proposé intégrant cycle de vie et chaîne logistique	63
Figure III.1 : Le modèle DFL de Dowlatshahi (1996)	68
Figure III.2 : Approche proposée intégrant PLM et modèles mathématiques	72
Figure III.3 : Maillons de la chaîne logistique liés par le PLM	73
Figure III.4 : Démarche proposée de conception du produit et de sa chaîne logistique	76
Figure III.5 : Optimisation des coûts des maillons de la chaîne logistique	80
Figure III.6 : Diagramme de classes modélisant la démarche proposée	82
Figure III.7 : Diagramme de séquences - Intégration des contraintes	85
Figure III.8 : Diagramme de séquences - Nécessité de reconfigurer certains maillons	86
Figure III.9 : Diagramme de séquences - Nécessité de concevoir de nouveaux maillons	87
Figure III.10 : Diagramme de séquences - Optimisation des maillons de la chaîne	88
Figure III.11 : Diagramme de séquences - Validation conception produit/chaîne	89
Figure III.12 : Les trois aspects de la démarche proposée	90
Figure IV.1 : Approche d'optimisation adoptée	95
Figure IV.2 : Algorithme de la démarche de sélection des fournisseurs	99

Figure. IV. 3 : Nomenclature adoptée	101
Figure IV.4 : Réseau de distribution adoptée	108
Figure IV.5 : Schéma illustrant les délais de livraison	110
Figure V.1 : Les trois modules composant notre outil d'aide à la décision	116
Figure V.2 : Diagramme Cas d'utilisation – Modélisation de l'architecture Produit	117
Figure V.3 : Diagramme cas d'utilisation – Modélisation de la structure de la chaîne	118
Figure V.4 : Diagramme cas d'utilisation – Optimisation de la chaîne logistique	119
Figure V.5 : Diagramme de classes – Modèle PLM/Optimisation de la chaîne logistique	120
Figure V.6 : Classe d'association « Semi-fini_machine »	121
Figure V.7 : Classe d'association ternaire « Production »	122
Figure V.8 : Classe d'association ternaire « Approvisionnement MP »	123
Figure V.9 : Classe d'association ternaire « Stockage Produit »	123
Figure V.10 : Classe d'association « Transport MP »	124
Figure V.11 : Classe d'association 5-aire « Transport Produit_amont »	124
Figure V.12 : Classe d'association ternaire «Transport Produit_aval »	125
Figure V.13 : Classe d'association ternaire «Demande client »	125
Figure V.14 : Intercalaire pour stabiliser les yaourts dans le casier plastique	127
Figure V.15 : Cycle de vie de la caisse en carton	128
Figure V.16 : Dimensions des pots de yaourts	129
Figure V.17 : Modèle PLM_caisse en carton	131
Figure V.18 : Maillons de la chaîne logistique étudiée	133
Figure V.19 : Nomenclature du produit étudié	136
Figure V.20 : Démarche de conception produit/chaîne appliquée à l'étude de cas	137
Figure V.21 : Plateau à verrouillage automatique retenu	139
Figure V.22 : Palettisation des caisses	140

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Contributions du PLM aux enjeux de l'entreprise	21
Tableau II.1 : Synthèse des principaux outils de modélisation	53
Tableau III.1 : Quelques contraintes à prendre en considération dans la conception	77
Tableau IV.1: Critères de sélection des fournisseurs	96
Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients des méthodes	98
Tableau IV.3 : Matrice de détermination du poids de chaque critère	100
Tableau IV.4 : Matrice de jugement de chaque fournisseur	100
Tableau V.1 : Contraintes relatives à chaque maillon	134
Tableau V.2 : Coût de chaque conception	138

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Concepts généraux, Etat de l'art.....	8
Introduction	8
1. Activité de conception du produit	9
1.1. Définition de la conception	9
1.2. Evolution de l'ingénierie séquentielle vers l'ingénierie concourante.....	11
2. Cycle de vie du produit	12
2.1. Définition du cycle de vie du produit	12
2.2. Modèles de cycle de vie	13
2.3. La conception, phase stratégique du cycle de vie produit	15
3. Gestion de cycle de vie du produit (Product Lifecycle Management, PLM).....	16
3.1. Définitions du PLM.....	17
3.2. Objectifs du PLM	20
3.3. PLM : solution technologique.....	21
3.4. Fonctionnalités du PLM	23
3.5. Synthèse sur le PLM.....	25
4. Chaînes logistiques	25
4.1. Définition d'une chaîne logistique	26
4.2. Activités d'une chaîne logistique	28
4.3. Flux de la chaîne logistique	29
4.3.1. Le flux physique	30
4.3.2. Le flux financier	30
4.3.3. Le flux d'information	31
4.4. Gestion de la chaîne logistique	32
4.5. Décisions relatives à la gestion de la chaîne logistique	33
4.5.1. Décisions stratégiques	33
4.5.2. Décisions tactiques	34
4.5.3. Décisions opérationnelles	34
4.6. Gestion centralisée/décentralisée de la chaîne logistique	34
4.6.1. Mode centralisé	34
4.6.2. Mode décentralisé	35
4.7. Etat de l'art sur la conception des chaînes logistiques	36
4.8. Problèmes liés à la conception de chaînes logistiques	37
4.8.1. Evolution de l'environnement	37
4.8.2. Evolution des problèmes de production	37
4.8.3. Difficulté de mise en œuvre des méthodes classiques d'aide à la décision.....	38
4.9. Pistes de solutions abordées	38
4.9.1. Réactivité de la chaîne aux changements	38
4.9.2. Définition intégrée de la chaîne logistique	39
4.9.3. Conception du produit et de sa chaîne logistique.....	39
5. Positionnement de notre thèse	39
Conclusion	40

Chapitre 2 : Modèle PLM intégrant cycle de vie et chaîne logistique	41
Introduction	42
1. Méthodes de conception de systèmes d'information et de modélisation des entreprises....	42
1.1. Approches cartésiennes	43
1.1.1. Réseaux de files d'attente	43
1.1.2. Réseaux de Pétri	44
1.1.3. SADT (Structured Analysis Design Technique)	44
1.1.4. IDEFx (Integration DEFinition)	45
1.1.5. SA-RT (Structured Analysis – Real Time)	46
1.2. Approches systémiques	46
1.2.1. MERISE	46
1.2.2. CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture)....	47
1.2.3. PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture)	48
1.2.4. GERAM (Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology)...	48
1.3. Approche « kénétique » – Les systèmes multi-agents	49
1.4. Approches orientées objet	50
1.4.1. Le langage unifié UML.....	50
1.4.2. UEML (Unified Enterprise Modelling Language).....	52
1.5. Synthèse	52
2. Modèles PLM	55
3. Modèle PLM proposé	57
3.1. Classe « produit »	57
3.2. Classe « phase »	58
3.3. Classe « acteur logistique »	59
3.4. Classe « ressource »	60
3.5. Classe « contrainte »	61
3.6. Classe « activité »	62
3.7. Classe « document »	62
3.8. Modèle PLM global	62
Conclusion	63

Chapitre 3 : Méthodologie basée sur le PLM pour la conception du produit et de sa chaîne logistique	65
Introduction.....	66
1. Etat de l'art sur la conception du produit et de sa chaîne logistique	66
1.1. Intégration des contraintes logistiques dans la conception du produit	67
1.2. Conception de la chaîne logistique en considérant les contraintes du produit	69
1.3. Conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique	70
1.4. Bilan et positionnement	71
1.5. Approche adoptée	73
2. Méthodologie de conception du produit et de sa chaîne logistique	74
3. Description de la démarche proposée	75
3.1. Détermination des contraintes de la chaîne logistique	77
3.2. Réalisation de la maquette numérique et archivage des données.....	78
3.3. Vérification si le produit est adapté aux maillons existants	78

3.3.1. Cas 1 : Nécessité de reconfigurer certains maillons existants	78
3.3.2. Cas 2 : Nécessité de concevoir de nouveaux maillons	79
3.4. Optimisation des maillons de la chaîne logistique	80
3.5. Condition de validation d'une conception produit/chaîne logistique	81
3.6. Synthèse	81
4. Modélisation UML de la démarche proposée	82
4.1. Diagramme des classes	82
4.1.1. Classe « Maquette numérique »	82
4.1.2. Classe « Acteur logistique »	83
4.1.3. Classe « Optimisation mathématique »	84
4.1.4. Classe « Document »	84
4.2. Diagramme de séquences	84
4.2.1. Conception de la maquette numérique	85
4.2.2. Conception des maillons de la chaîne logistique	86
4.2.3. Optimisation du coût des maillons de la chaîne logistique	87
Conclusion	89
Chapitre 4 : Optimisation mathématique de la chaîne logistique	92
Introduction	92
1. Caractéristiques des modèles d'optimisation	93
2. Approche d'optimisation adoptée	94
3. Optimisation des maillons de la chaîne logistique	96
3.1. Optimisation du maillon « Fournisseur »	96
3.1.1. Critères de sélection des fournisseurs	96
3.1.2. Méthodes de sélection des fournisseurs	97
3.1.3. Démarche adoptée pour le choix des fournisseurs	99
3.1.4. Modélisation mathématique	101
3.1.4.1. Indices et paramètres du modèle	102
3.1.4.2. Variables de décision	102
3.1.4.3. Fonction objectif d'approvisionnement	103
3.1.4.4. Contraintes	103
3.2. Optimisation du maillon « Entreprise de production »	104
3.2.1. Hypothèses	104
3.2.2. Indices	104
3.2.3. Paramètres du modèle	104
3.2.4. Variables de décision	105
3.2.5. Fonction objectif de production	106
3.2.6. Contraintes	107
3.3. Optimisation du maillon « Transport »	107
3.3.1. Indices	108
3.3.2. Paramètres du modèle	108
3.3.3. Variables de décision	109
3.3.4. Fonction objectif de transport	109
3.3.5. Contraintes	109
3.4. Optimisation du maillon « Entrepôt »	110

3.4.1. Paramètres du modèle	111
3.4.2. Variable de décision	111
3.4.3. Fonction objectif de stockage	111
3.4.4. Contraintes	111
Conclusion	112
Chapitre 5 : Outil d'aide à la décision PLM/Optimisation de la chaîne logistique :	
Modélisation de l'outil et Etude de cas	114
Introduction	115
1. Outil d'aide à la décision PLM/Optimisation de la chaîne logistique	115
1.1. Spécifications fonctionnelles de l'outil	115
1.2. Modélisation UML	117
1.2.1 : Diagrammes de cas d'utilisation	117
1.2.2 : Diagramme de classes	119
2. Etude de cas : Emballage secondaire pour l'industrie de transformation laitière.....	126
2.1. Mise en situation	126
2.2. Cycle de vie de la caisse en carton	127
2.3. Eléments du cahier de charges	127
2.4. Application du modèle PLM au cas de la caisse en carton	131
2.5. Application de la démarche de conception du produit et de sa chaîne logistique	133
2.5.1. Définition des maillons existants et des nouveaux maillons de la chaîne logistique	133
2.5.2. Détermination des contraintes imposées par les maillons existants et celles des nouveaux maillons (anticipées par le concepteur)	134
2.5.3. Conception de la caisse en carton	135
2.5.4. Conception de la chaîne logistique relative à la nouvelle caisse	135
Conclusion	141
Conclusion générale et Perspectives	142
Références bibliographiques	146
Liste des publications	162
Annexes	163

Introduction générale

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une cotutelle Maroco-Française entre l'Université du Havre et l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Meknès. Ces travaux de recherche ont été menés dans le cadre du CEMUR (Coopération Europe Maghreb des Universités en Réseau).

La complémentarité scientifique entre l'équipe SILI (Système d'information de Logistique Intégrée) du Havre et l'équipe MOL (Modélisation, Optimisation et Logistique) de Meknès a orienté nos travaux de thèse dans le domaine de la gestion de cycle de vie des produits (PLM : Product Lifecycle Management) pour l'optimisation des chaînes logistiques.

Par ce travail, nous voulons rapprocher deux communautés scientifiques : celle dédiée au PLM et celle consacrée à l'étude des problèmes relatifs à l'optimisation des chaînes logistiques (avec une orientation principalement mathématique). Notre objectif est de coïncider PLM et modèles mathématiques pour l'optimisation des chaînes logistiques.

Le PLM est avant tout une stratégie d'entreprise. Il peut être défini comme étant une approche intégrée de gestion collaborative des informations relatives au produit tout au long de son cycle de vie (Terzi, 2005).

Nous retenons également la vision de Francis Bernard, co-fondateur de Dassault Systèmes et créateur du logiciel de conception assistée par ordinateur CATIA qui considère que le PLM permet de simuler la réalité du produit de manière numérique, virtuelle : la vie complète du produit et de son environnement, en intégrant tous les partenaires en mode collaboratif (Debeacker, 2004).

Dans l'environnement hautement concurrentiel actuel, les entreprises réalisent qu'offrir le meilleur produit au plus bas prix n'est pas seulement lié aux fonctions, activités et processus au sein de l'entreprise elle-même, mais à l'ensemble de sa chaîne logistique (Barratt et al., 2011).

En outre, les avancées technologiques soutenues qu'ont connues les Sciences et Technologies d'Information et de Communication au cours des dernières décennies ont progressivement modifié l'entreprise et la manière de travailler en son sein et avec ses partenaires (Benabdlehafid, 2001). L'entreprise tend, par nécessité, vers une relation de collaboration entre les différents partenaires de sa chaîne logistique.

De ce fait, il est essentiel pour les entreprises d'exploiter les avantages liés à l'intégration des acteurs de la chaîne logistique et le partage de l'information afin d'améliorer sa performance.

Une meilleure efficacité peut être atteinte si cette intégration se fait au début du cycle de vie du produit, en particulier, dans le processus de conception (Tang et al., 2004).

En effet, la conception est une activité interactionnelle, collective et sociotechnique (Jeantet et Boujut, 1998). Le succès d'un nouveau produit dans son marché est de plus en plus dépendant de variables autres que les notions classiques de sa fonctionnalité technique et de son coût de production (Koike, 2010).

Dans l'environnement des projets de conception, l'interprétation même du triptyque coût, qualité et délai se transforme, à partir du moment où il intègre le point de vue d'autres fonctions métiers qui participent au cycle de vie du produit.

Aujourd'hui, le coût total du produit ne concerne plus seulement la production, mais aussi les coûts de gestion de la chaîne logistique : de transport, de stockage, de mise hors service du produit (son recyclage ou bien sa destruction)... La qualité concerne aussi la relation avec le client, la livraison du produit, le service après-vente, l'adhésion et le respect des nouvelles réglementations socio- environnementales. Les délais ne concernent plus le seul temps de conception et de lancement sur le marché. Il s'agit aussi des délais de la chaîne logistique pour gérer, approvisionner, produire et livrer le produit au client, selon la configuration commandée et dans les conditions préalablement définies.

En traitant les problèmes liés à la chaîne logistique dès les premières phases du développement de produits, c'est-à-dire au niveau de la maquette numérique, les entreprises peuvent réduire la complexité, les coûts et les risques et mettre plus rapidement sur le marché des produits plus rentables.

Ainsi, le développement collaboratif de produits est devenu une tendance dans l'industrie manufacturière. Cette collaboration pluridisciplinaire exige un partage massif des données entre les partenaires en amont et en aval d'une chaîne logistique donnée. Cela a conduit à l'émergence d'un nouveau type de besoin : celui de créer des systèmes collaboratifs regroupant tous les acteurs de la chaîne logistique participant au cycle de vie du produit (Geryville, 2008).

Pour répondre à ce besoin, le Système d'Information de Logistique Intégrée (SILI), utilisant le concept d'entreprise étendue, contribue à l'intégration, au niveau conceptuel, de l'ensemble des

informations liées à un produit tout au long de son cycle de vie. Le SILI concerne la logistique globale et implique l'intégration des informations des moyens de production, des points de stockage et des moyens de transport (Benabdelhafid, 1998)

De ce fait, il permet d'offrir aux différents partenaires de l'entreprise étendue un environnement collaboratif leur permettant de travailler ensemble et de partager l'ensemble les informations relatives au produit tout au long de son cycle de vie.

Le but de la logistique intégrée est d'arriver à un modèle complet du SILI, formel et agréé par tous les partenaires. On considère l'analyse dirigée par trois objectifs (Benabdelhafid, 2000) :

- Modélisation du produit par l'ensemble des informations qui lui sont liées tout au long de son cycle de vie (Axe PLM).
- Modélisation de la communication entre les différents composants de la chaîne logistique par l'échange de données informatisées (Axe communication).
- Modélisation de l'objectif organisationnel : problèmes d'optimisation et de recherche opérationnelle (Axe organisationnel).

Notre travail traitera de l'axe PLM. Nous voulons répondre à la question : **Comment le PLM pourra t-il contribuer à l'optimisation de la chaîne logistique ?**

Il nous paraît alors propice d'explorer ce que peut offrir le PLM pour la chaîne logistique, nous exploitons ainsi les points suivants :

- L'intégration des contraintes des acteurs de la chaîne logistique dès **la phase de conception**.
- **La collaboration** des différents acteurs de la chaîne logistique et qui sont responsables des phases de cycle de vie du produit (Bouhaddou et al., 2012 a).
- La conception **simultanée du produit et sa chaîne logistique** pour que, d'une part, le produit soit adapté à sa chaîne logistique et d'autre part, pour optimiser les coûts de celle-ci.
- **La capitalisation du savoir et savoir-faire issus de la conception et archivage** de toutes les informations relatives au produit pour leur exploitation et notamment leur réutilisation.
- La possibilité de faire des **modifications** à chaque fois qu'il y a de nouveaux aléas au niveau de chaque maillon de la chaîne logistique vu qu'une stratégie de chaîne logistique

basée sur la flexibilité et la rapidité est la meilleure approche pour gérer la pression croissante que subissent les chaînes logistiques actuelles.

Même si le PLM s'étend tout au long du cycle de vie, nous nous intéressons en particulier à la phase de conception (sans pour autant négliger les autres phases).

Nous étudions principalement le problème de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique optimisée.

Un état de l'art des travaux traitant de la conception du produit et de sa chaîne logistique a montré que ces problèmes intégrés génèrent des modèles mathématiques complexes. Ceux-ci utilisent un très grand nombre de variables pour modéliser le problème d'une façon complète et sont, par conséquent, difficiles à résoudre.

Nous proposons, dans cette thèse, une approche hybride combinant PLM et modèles mathématiques pour optimiser les décisions de conception du produit et de sa chaîne logistique.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres :

Notre thèse se situe au carrefour des recherches sur le PLM et les chaînes logistiques. L'objectif du **chapitre 1**, est de présenter les différents concepts relatifs à ces domaines de recherche. Traiter de la problématique d'optimisation des chaînes logistiques en utilisant le PLM requiert préalablement que la notion de PLM soit précisée. Le sens même de l'expression Product Lifecycle Management n'est pas clair, pas plus que sa traduction française gestion du cycle de vie des produits. D'autre part, la multitude de définitions ne contribue pas à éclaircir ce concept. L'objectif est donc de dresser un état de l'art permettant d'aboutir à une vision claire de la notion de PLM.

Ensuite, nous présentons une analyse bibliographique sur les chaînes logistiques. Nous étudions les modes centralisé et décentralisé de gestion de la chaîne logistique. Nous traitons particulièrement le problème de conception des chaînes logistiques.

Le chapitre 2 est consacré à la modélisation du PLM. En premier lieu, nous passons en revue les langages et/ou méthodes de modélisation en entreprise. Nous nous intéressons aux modèles PLM proposés dans la littérature. Ensuite, nous proposons un modèle PLM, adapté à notre contexte, il s'agit d'un modèle pour la gestion des informations du produit tout au long du cycle de vie du produit et intégrant les différents acteurs de la chaîne logistique (Bouhaddou et al., 2012 b).

Le chapitre 3 constitue le cœur de notre travail. Nous y présentons une méthodologie basée sur le PLM pour la conception du produit et de sa chaîne logistique (Bouhaddou et al., 2013). Contrairement aux approches classiques centralisées utilisées pour traiter le problème intégré de conception du produit et de sa chaîne logistique et qui engendrent des modèles mathématiques compliqués, nous adoptons une démarche couplant des décisions centralisées quand il s'agit d'intégrer les contraintes des différents maillons de la chaîne logistique et une approche décentralisée quand il s'agit d'optimiser localement par programmation mathématique chaque maillon de la chaîne.

Le mode décentralisé réduit la complexité de résolution des modèles mathématiques et permet à la chaîne logistique de répondre rapidement à l'évolution des conditions locales de chaque maillon.

Le PLM jouera le rôle d'intégrateur. En effet, le regroupement centralisé des informations par le PLM permet de prendre en considération la dépendance entre les maillons améliorant ainsi les résultats obtenus par optimisation locale.

La démarche proposée est modélisée par le langage UML (Unified Modelling Language).

Le chapitre 4 est dédié à l'optimisation mathématique de la chaîne logistique. Dans un premier temps, nous explicitons l'approche d'optimisation adoptée, il s'agit d'une optimisation point par point qui consiste en une suite d'optimisations locales des différents maillons constituant la chaîne logistique. Ensuite, nous détaillons les modèles mathématiques d'optimisation (Bouhaddou et al., 2014). L'objectif est de minimiser les coûts d'approvisionnement, les coûts de production, les coûts de stockage et les coûts de transport.

Le chapitre 5 présente dans la première section, l'outil d'aide à la décision basé sur la méthodologie proposée pour la conception simultanée du produit et sa chaîne logistique optimisée.

La deuxième section est dédiée à une étude de cas issue du monde industriel. Il s'agit du cas de la conception simultanée d'un nouvel emballage pour l'industrie de transformation laitière et sa chaîne logistique associée, dans un contexte PLM.

Enfin, une conclusion générale synthétise nos principales contributions et présente les perspectives ouvertes à la suite de ces travaux.

Le schéma synoptique suivant (figure. 1) décrit l'organisation de ce manuscrit.

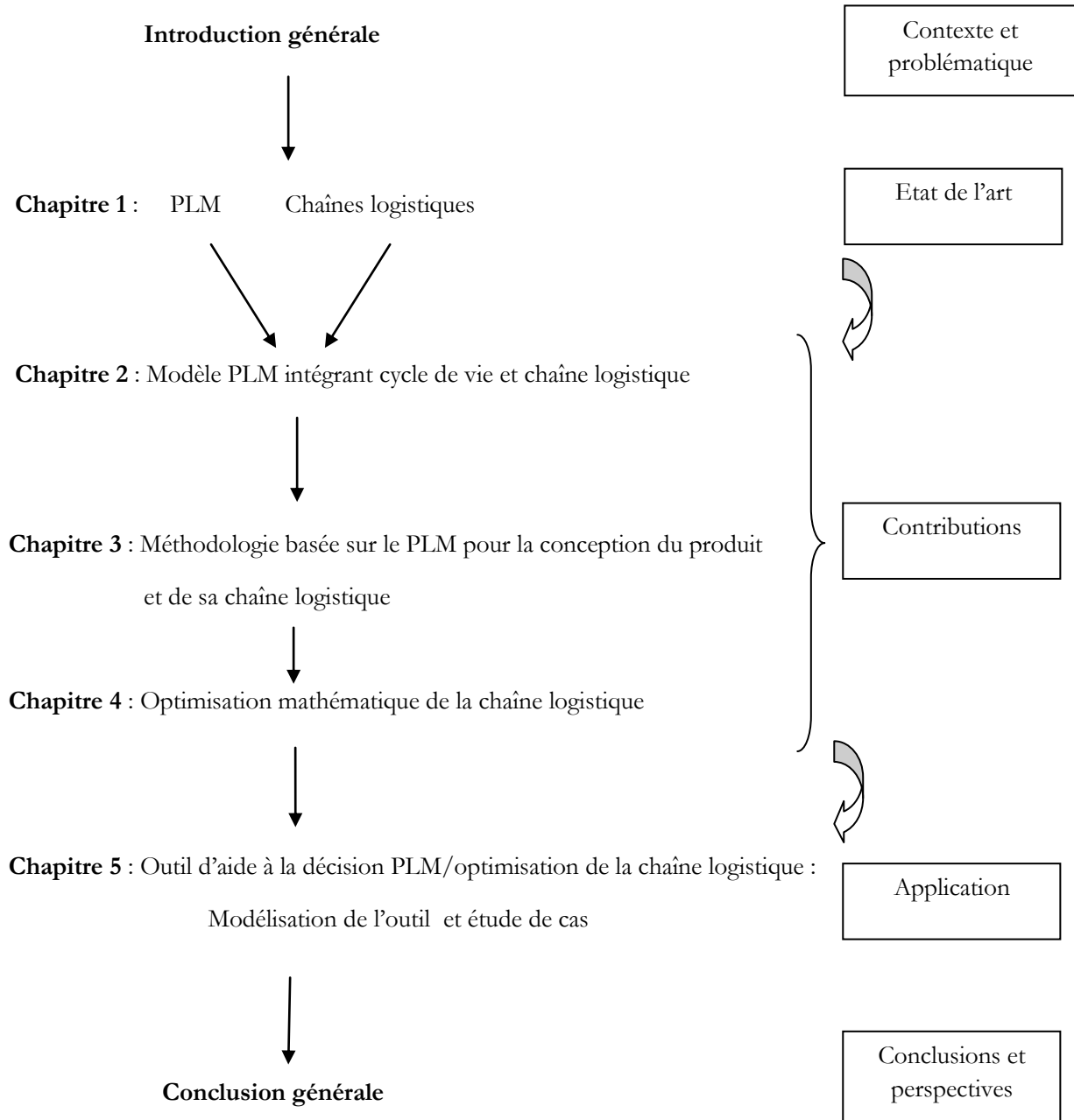


Figure. 1 : Représentation synoptique de l'organisation de la thèse

Chapitre 1 :
Concepts généraux, état de l'art

Introduction

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 rapidement et sans erreurs aux besoins de ses clients. 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.

Consciente que l'unité de compétitivité n'est plus l'entreprise mais toute la chaîne logistique contribuant à la réalisation du produit, les efforts consentis par l'entreprise se matérialisent, d'une part, par la volonté de maîtriser au mieux les activités de conception des produits en vue de garantir des délais de développement les plus courts possibles et d'autre part, par la construction de collaborations avec des partenaires externes rendues accessibles par les progrès des technologies de l'information et de la communication.

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts relatifs aux différents domaines de recherche qui touchent aux problèmes étudiés dans cette thèse. Ce chapitre s'articule autour de trois axes :

Nous présentons, dans le premier axe, le processus de conception, l'évolution de l'ingénierie séquentielle vers l'ingénierie concourante ainsi que la notion de cycle de vie du produit. Nous mettons en avant l'importance de la phase de conception dans le cycle de vie.

Le deuxième axe étudie le PLM (Product Lifecycle Management ou gestion de cycle de vie des produits) en tant que concept lié à l'ingénierie concourante, son principe, ses objectifs et ses dimensions prédominantes.

Dans le troisième axe, nous dressons un état de l'art sur les chaînes logistiques : définitions, activités de la chaîne logistique, décisions prises aux différents niveaux de la chaîne, gestion centralisée ou décentralisée de la chaîne. Nous nous intéressons particulièrement aux problèmes de conception du produit et de sa chaîne logistique.

1. Activité de conception du produit

La conception est une activité variée et complexe qui implique de nombreux acteurs qui interviennent tout au long du cycle de vie des produits. De nombreuses démarches systématiques ou méthodologiques ont été développées pour formaliser et accompagner le processus de conception de produits de l'idée à la réalisation.

La conception diffère des sciences dites exactes car l'objet conçu sera un compromis qui répondra plus ou moins bien aux différentes requêtes car celles-ci sont souvent antagonistes ou contradictoires (Jansen, 1990, Matthews et al., 2002).

Dans ce sens, plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à développer des méthodes permettant d'organiser le processus de conception et des outils supportant les différentes tâches de ce processus. Ces travaux visent à rationaliser l'acte de conception en répondant aux différentes exigences du cahier des charges et des différents acteurs de cycles de vie du produit (Sallaou, 2008).

C'est ainsi que l'ingénierie séquentielle a évolué vers l'ingénierie concurrente. Elle est devenue collaborative grâce notamment aux outils informatiques permettant la définition d'un prototype virtuel, le partage des informations, etc.

1.1. Définition de la conception

Nombreuses sont les définitions de la conception dans la littérature, selon le champ disciplinaire et le contexte dans lequel chaque définition est proposée. Selon une vision plutôt industrielle, Pahl et Beitz (1996) définissent la conception comme une activité d'ingénierie qui concerne tous les domaines de la vie humaine, dans laquelle l'ingénieur concepteur mobilise ses connaissances scientifiques et son expérience afin d'apporter des solutions au problème préalablement défini pour la réalisation de l'artefact.

Cette définition soulève une approche très répandue de la conception : il s'agit d'une activité de résolution de problèmes (Minemann, 1991; Cross, 1994 ; Pahl et Beitz, 1996 ; Simon, 1996). Selon cette approche, l'activité de conception est vue comme la recherche continue de la solution pour un problème donné. Le travail du concepteur serait donc de chercher dans l'espace de solutions de conception possibles quelle est la meilleure, tout en respectant les spécificités du problème, sa complexité, ses objectifs, ses contraintes, etc (Koike, 2005).

Pahl et Beitz (1996) ont défini un processus de conception basé sur une approche systématique constituée de quatre phases principales :

- définition du problème : cette étape s'intéresse à la définition du contexte économique, l'expression et la validation du besoin client, la traduction de ce besoin en termes de spécifications fonctionnelles synthétisées dans un cahier des charges fonctionnel ;
- innovation/recherche de solutions possibles : après avoir mené une étude d'analyse fonctionnelle interne (conduisant à l'architecture fonctionnelle du produit), cette phase s'attache à ouvrir le plus largement possible l'espace des solutions possibles. Une analyse de faisabilité permet de choisir la meilleure solution au regard des critères coût/qualité/délai ;
- conception préliminaire où les principes constructifs choisis permettent de définir l'architecture technique du produit. Cette architecture permet d'initier le travail collaboratif ;
- conception détaillée qui a pour objectif de définir complètement le produit et vérifier qu'il satisfait les spécifications fonctionnelles.

Ces phases sont à leur tour découpées en activités et tâches avec des livrables précis. Selon les auteurs, plusieurs allers-retours entre les phases peuvent être nécessaires avant d'arriver à une solution acceptable.

Selon la littérature du domaine, les dynamiques des activités et des prises de décision de conception font que, plus on avance dans le projet, moins l'on dispose de degrés de liberté pour modifier les décisions en créant ainsi des irréversibilités (Midler, 1993). Par conséquent, il existe un intérêt légitime à anticiper l'impact des choix de conception sur les coûts du produit le plus en amont possible des projets (figure I.1).

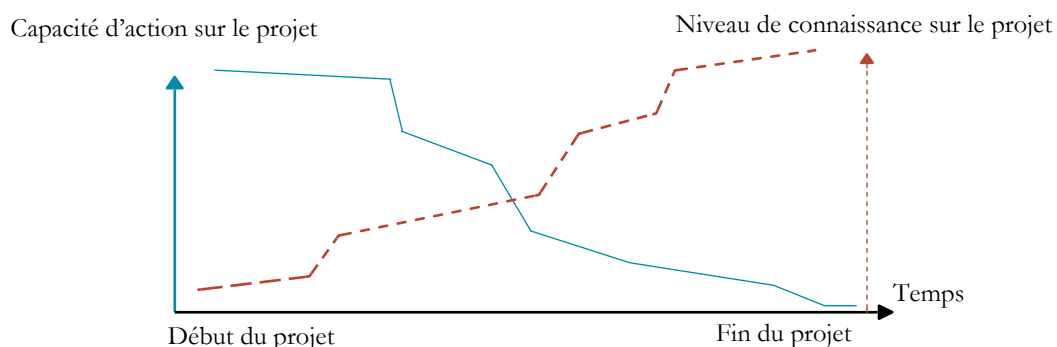


Figure I.1 : Capacité d'action sur le projet (Midler, 1993)

1.2. Evolution de l'ingénierie séquentielle vers l'ingénierie concurrente

Le processus de développement de produits est basé de plus en plus sur la collaboration de différents acteurs afin de répondre au mieux aux exigences simultanées de qualité, de délai et de coût qui y sont liées.

C'est ainsi que l'ingénierie séquentielle a évolué vers l'ingénierie concurrente ou simultanée. Dans l'approche séquentielle, la connaissance sur la conception est créée séquentiellement ; les activités sont réalisées selon un flux informationnel qui passe d'une fonction métier à l'autre.

En revanche, dans l'approche concurrente, le processus de conception est réalisé par des équipes pluridisciplinaires qui sont organisées de manière à faciliter les échanges le plus tôt possible entre les différents métiers qui participent aux efforts du projet (Clark et Wheelwright, 1993).

En effet, l'ingénierie concurrente, propose un chevauchement des tâches dont l'objectif est une meilleure prise en compte des contraintes de chaque métier tout au long du développement du produit, et qui doit se traduire par une coordination des différentes équipes autour d'un objectif commun (Sohlenius, 1992 ; Prasad, 1996). Cela permet de concevoir à la fois le produit et son processus productif, voire toute sa chaîne logistique ce qui va réduire le temps global du projet et le risque de remise en cause des choix (figure I.2).

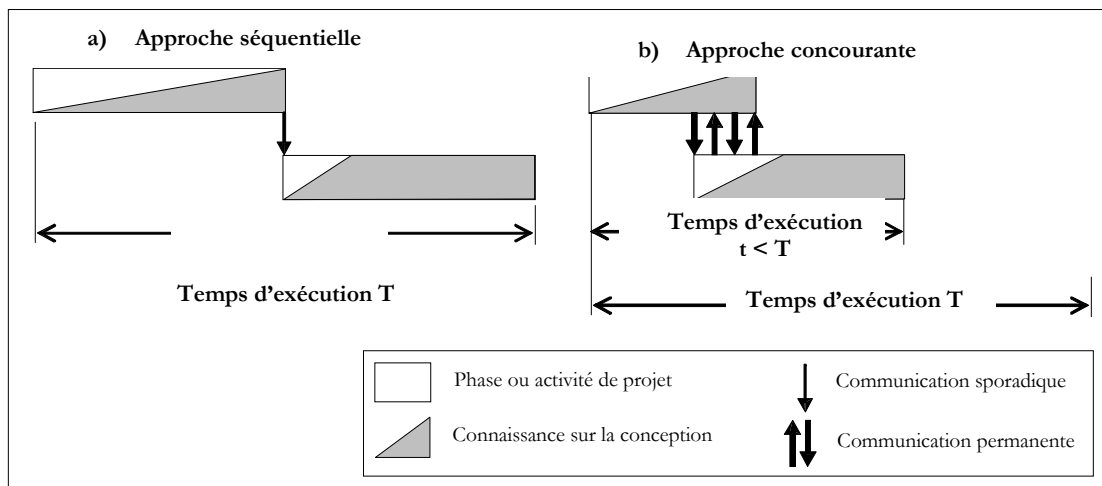


Figure I.2 : Deux approches différentes d'exécution des activités de conception : (a) : séquentielle, (b) : concurrente (adaptée de (Clark et Wheelwright, 1993)).

2. Cycle de vie du produit

2.1. Définition du cycle de vie du produit

De manière générale, le cycle de vie du produit, dans une approche conceptuelle, indique l'ensemble de toutes les phases reconnues comme des étapes plus ou moins indépendantes, poursuivies par le produit depuis l'idée de sa création (sa naissance) jusqu'à son retrait ou son démantèlement (sa mort), telles que : la conceptualisation, la conception, la planification des gammes de fabrication, la production, la distribution, l'utilisation, le démantèlement et parfois le recyclage (Verschoor et Reijnders, 1999).

Il existe aussi l'approche marketing qui décrit le cycle de vie du produit dans le marché, il se compose des phases de lancement, croissance, maturité et déclin. Il décrit l'évolution des volumes de ventes ou du profit en fonction du temps (figure I.3).

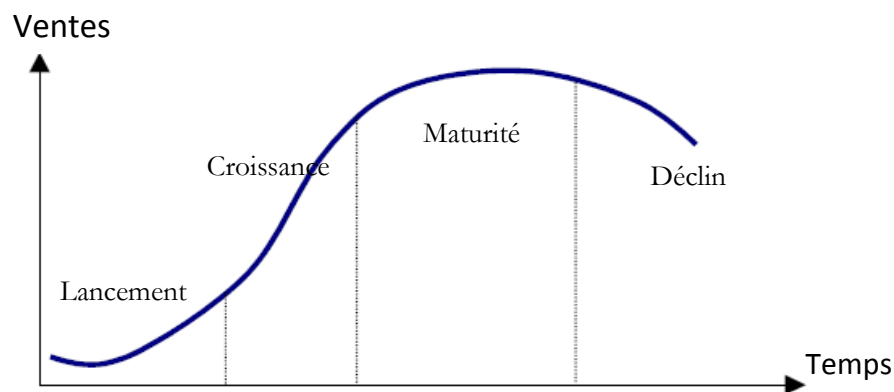


Figure I.3 : Phases du cycle de vie produit au marché (Onkvisit, 1998)

Dans le but d'avoir une compréhension unique de ce concept, toute référence au cycle de vie produit dans ce mémoire, se rapportera à la séquence des étapes de la vie «conceptuelle» du produit et non à son cycle de vie du point de vue marketing.

2.2. Modèles de cycle de vie

Le modèle STEP (STandard for the Exchange of Product) définit un modèle de référence pour les phases de cycles de vie des produits décrit dans la figure I.4 ; même si plusieurs entreprises définissent leur propre modèle de référence comme dans (Van Moll, 2002).

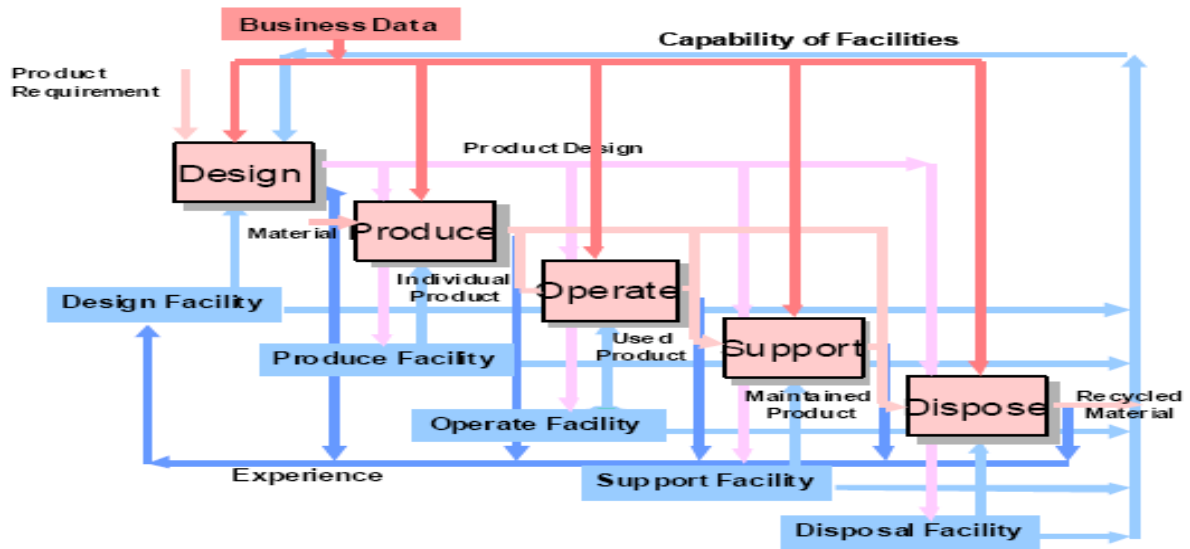


Figure I.4 : Modèle de référence STEP de cycle de vie du produit (STEP, 1995)

Le modèle GERAM (Generalized Enterprise Reference Architecture) (GERAM, 1998) décrit les différentes phases du cycle de vie allant de l'idée jusqu'au rebut ou fin de vie (figure I.5).

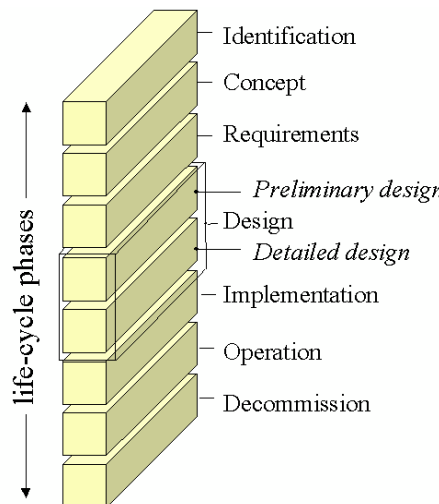


Figure I.5 : Modèle de référence du GERAM pour le cycle de vie produit (GERAM, 1998)

Le modèle de GERAM comprend les étapes suivantes :

- La recherche (identification) : s'occupe principalement de rechercher, évaluer et sélectionner les technologies à utiliser pour le développement du produit ;
- La conceptualisation (concept) : désigne l'ensemble des activités nécessaires à la conceptualisation de l'idée à l'origine du produit, sa définition, ses objectifs stratégiques... ;

- L'analyse des besoins (requirements): désigne l'ensemble des activités nécessaires à l'expression des besoins opérationnels de l'entreprise ;
- La conception (design) : l'ensemble des activités qui s'intéressent à la conception du produit satisfaisant le mieux les besoins exprimés à la phase précédente. Elle comprend la conception préliminaire et la conception détaillée ;
- L'implémentation : consiste à réaliser les solutions retenues à l'issue de la conception ;
- La mise en service (operation) : l'utilisation effective des produits et leur commercialisation ;
- Le démantèlement (decommission) : le retrait des produits en fin de vie.

Dans d'autres travaux, le cycle de vie d'un produit est composé de trois phases importantes : Début de vie, Milieu de vie et Fin de vie (Abramovici et Sieg, 2002 ; Kiritsis et al., 2003 ; Jun et al., 2007).

Jun et al. (2007) ont introduit le design et la production dans la phase de Début de vie du produit ; la maintenance, l'utilisation et la distribution dans la phase de Milieu de vie et finalement le recyclage et le rejet dans la phase de Fin de vie.

Terzi (2005) a opté pour un cycle de vie se composant de quatre phases : développement du produit, production du produit, utilisation du produit et rejet du produit. Chaque phase est détaillée en plusieurs étapes :

- Phase de développement, cette phase comprend la conception du produit et de son process ;
- Phase de production qui comprend les activités de production et de distribution ;
- Phase d'utilisation qui comprend les activités d'utilisation du produit, de consommation et de maintenance ;
- Phase de rejet, c'est la dernière phase du cycle de vie, le produit est détruit, désassemblé ou recyclé.

2. 3. La conception, phase stratégique du cycle de vie

D'une manière générale, l'offre et la complexité des produits croissent, alors que le temps de développement et la durée de vie des produits décroissent. La phase de conception, au début du cycle de vie produit, apparaît éminemment stratégique, et notamment ses phases très amont (Herstatt et Verworn, 2004). En effet, c'est lors de cette phase qu'est déterminée et décidée la grande majorité des caractéristiques et des comportements du futur produit, ainsi que son processus de fabrication, voire toute sa chaîne logistique.

C'est dans cette phase, qui pourtant ne consomme en général qu'environ 5 à 10% du coût du produit, que sont engagés plus de 80% des coûts sur l'ensemble du cycle de vie du produit (Dowlatshahi, 1996 ; Jeantet, 1998 ; Appelqvist et al., 2004).

En outre, on estime que 70% des coûts résultant de la non-qualité seraient dus à une mauvaise conception (Midler, 1997).

On constate également que la conception du produit est pratiquement responsable de 75% du coût du produit (Asiedu et Gu, 1998 ; Verganti, 1999 ; Barton et al., 2001). On considère que 80% à 95% du cycle de vie est pratiquement figé en fin de phase de conception, toute modification apportée ensuite au produit pour réduire certains coûts s'avérant particulièrement onéreuse ou inefficace, voire les deux (Laurentie et al., 2006).

De plus, d'après (Marin, 2009), 85% des coûts logistiques sont induits par des choix de conception ce qui fait de la conception, une phase stratégique du cycle de vie du produit.

Le déroulement du processus de conception permet d'enrichir graduellement les connaissances sur le produit faisant l'objet de la conception. Toutes ces informations propres au produit peuvent être exploitées pour réaliser et développer un support intégral, à l'aide d'un logiciel CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*), appelé maquette numérique virtuelle.

Ainsi, le processus de conception, visant à définir un produit virtuel, est fortement lié aux autres acteurs de l'entreprise détenant un savoir et un savoir-faire capitalisés : au cours de ses activités, chacun génère de la connaissance qu'il est nécessaire de mettre au service des acteurs de la conception pour travailler dans une démarche efficace de la gestion du cycle de vie des produits (Product Lifecycle Management).

3. Gestion de cycle de vie des produits (Product Lifecycle Management, PLM)

L'intensification de la concurrence et, parallèlement, l'évolution des technologies ont abouti à une complexification sans précédent de la conception, du développement et du lancement des produits. En conséquence, le produit et son développement ne sont plus l'œuvre d'une seule équipe ou d'une seule entreprise, mais résultent d'un travail d'équipe pluridisciplinaire coordonné autour des objectifs de la réalisation de ce produit.

De toute évidence, les entreprises doivent s'adapter aux changements qui s'opèrent dans l'environnement où elles évoluent. Ainsi, une collaboration pluridisciplinaire bien structurée répondra au mieux à cette problématique. L'entreprise industrielle se voit donc confrontée à différents enjeux :

- Un contexte d'entreprise étendue où elle doit définir une stratégie organisationnelle avec des entreprises partenaires dans des domaines d'expertise différents.
- Une complexité croissante des produits avec de fortes contraintes externes (exigences du développement durable, accélération des cycles de vie, normes qualité...).
- Une gestion globale de son patrimoine technique impliquant la gestion des données "produit" tout au long de son cycle de vie.

Une des réponses à ces enjeux, actuellement d'actualité est la gestion de cycle de vie du produit (ou *PLM : Product Lifecycle Management*). En fait, en réponse aux besoins des entreprises, de nombreux fournisseurs de solutions logicielles d'entreprise, de domaines divers en relation avec la conception de produits et la gestion de la production, développent des solutions adaptées à ces nouveaux besoins, participant ainsi à l'émergence et la stabilisation du paradigme PLM. Néanmoins, le PLM n'est pas un problème technologique, mais d'abord une stratégie d'entreprise.

Il existe dans la littérature, une multitude de définitions du PLM. L'objectif de cette section est donc de dresser un état de l'art permettant d'aboutir à une vision claire de cette notion.

3.1. Définitions du PLM

La gestion des données techniques du produit a démarré au début des années quatre-vingt-dix pour répondre aux besoins de gestion des données importantes de conception issues de la CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*). Cantonnés au bureau d'étude, les outils de gestion des données techniques ont permis d'avoir un suivi efficace des informations de conception des produits.

Aujourd'hui, la prise en compte de la gestion toute entière du cycle de vie du produit vise à étendre ce périmètre d'action aux disciplines qui gravitent autour du produit (Zina, 2007). Le PLM est apparu dans les années 2000, afin de maintenir une cohérence entre les approches intégrées, collaboratives (Kvan, 2000) et les méthodologies associées aux outils de XAO (*X Assisté par Ordinateur*), tels que les outils de CAO, les systèmes de gestion des données techniques (appelés aussi PDM, *Product Data Management*), en connexion avec les systèmes SCM (*Supply Chain Management*) et ERP (*Enterprise Resource Planning*) dans une unique chaîne numérique (Stark, 2004), où tous les départements de l'entreprise ont un rôle à jouer (Danesi et al., 2007). Le PLM englobe en plus de toutes les fonctionnalités du PDM, la notion de collaboration, d'entreprise étendue, d'intégralité du cycle de vie.

Le PLM a vu le jour en réponse à de nouveaux besoins, pour améliorer la gestion des processus techniques et les workflows¹ dans des chaînes logistiques réparties au niveau mondial. La possibilité d'adapter les données techniques pour les réutiliser à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise, de façon à optimiser les conceptions et à rationaliser les processus en aval, a profondément transformé le développement de produits (Abbassen, 2007).

Les définitions du PLM sont nombreuses, il y a celles qui mettent en avant le côté « approche » de ce concept alors que d'autres considèrent plus le PLM comme solution technologique. D'ailleurs, les organisateurs du PLM'2012, conférence de référence du PLM, concluaient la dernière journée en constatant que chacun des participants avait probablement une définition du PLM qui lui était propre. Ainsi, force est de constater que le concept « PLM » est difficile à caractériser.

CIMData, cabinet de conseil exerçant dans ce domaine, définit le PLM comme une approche

¹ Le workflow est défini par le "Workflow Management Coalition" (WfMC, 2004) comme l'automatisation totale ou partielle d'un processus au travers duquel des documents, des informations ou des tâches passent d'une personne à une autre pour subir des transformations selon des règles et des contraintes spécifiées a priori.

stratégique qui met en œuvre un ensemble cohérent de pratiques permettant de supporter la création collaborative ainsi que l'organisation, la diffusion et l'utilisation des informations relatives à la définition du produit au travers de l'entreprise étendue, de la conception à la fin de vie, et d'intégrer les hommes, les processus, les systèmes d'organisation et d'information (CimData, 2003).

D'après (Le Duigou, 2010), le PLM est avant tout une stratégie d'entreprise. Il s'agit de gérer toutes les informations relatives à un produit, sur l'ensemble de son cycle de vie depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie, et ce pour la totalité des acteurs internes et externes impliqués dans sa création.

Le PLM est une stratégie centrée sur le produit et mettant en avant des méthodologies, des processus et des systèmes d'informations à différentes phases du cycle de vie (Demoly, 2007) (figure I.6).

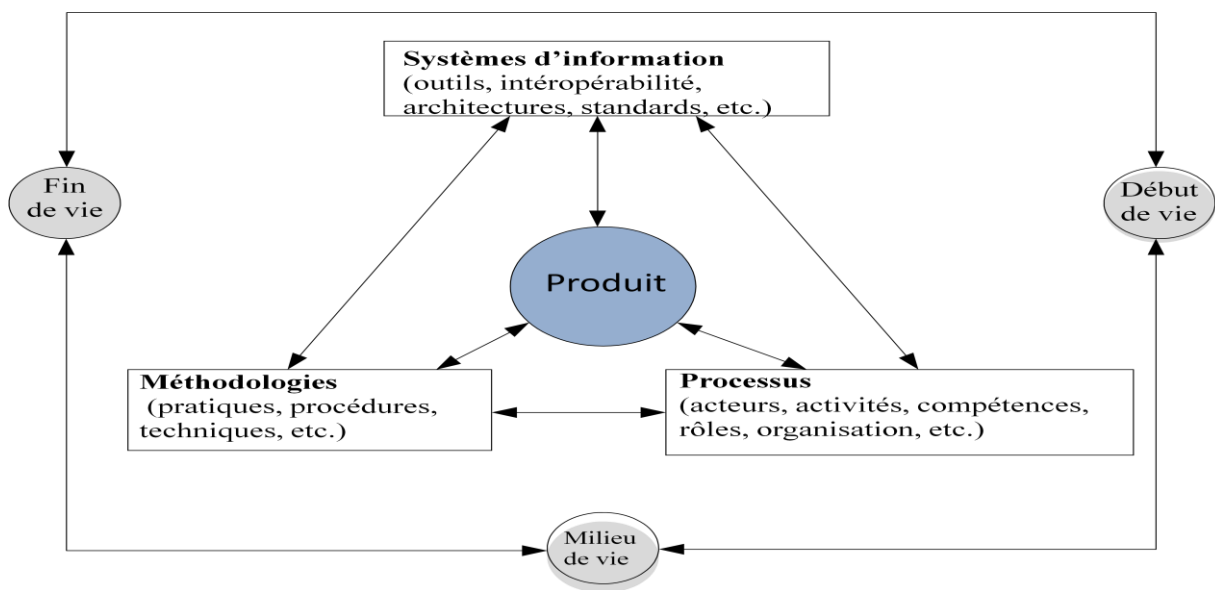


Figure I.6 : Stratégie PLM centrée sur le produit (Demoly, 2007)

Pour sa part, Pernelle (2009) présente le PLM comme un ensemble d'éléments (outils informatiques, dispositif organisationnel, méthodes de travail) du système d'information gérant les informations issues des différentes étapes de la vie des produits industriels et mettant à disposition toutes ces informations aux différents acteurs de l'entreprise étendue (Figure I.7).

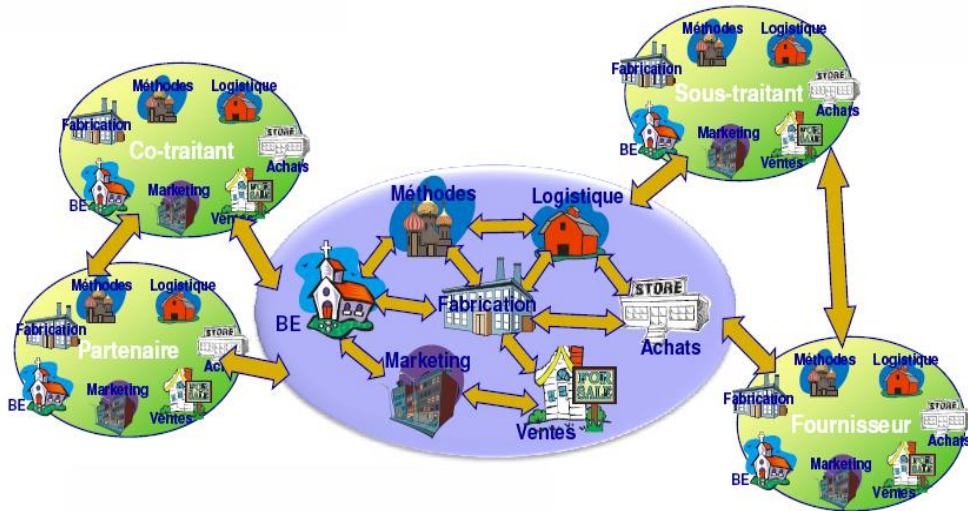


Figure I.7 : Partage des informations entre les membres de l'entreprise étendue (Debaecker, 2008)

La notion d'entreprise étendue est récurrente dans plusieurs définitions du PLM. Il est alors nécessaire de la clarifier. Brown et al. (1995) ont défini l'entreprise étendue comme étant une organisation ou une forme d'entreprise représentée en tout et en partie par les clients, les fournisseurs et les sous-traitants engagés d'une façon collaborative pour la conception, le développement, la production et la livraison de produits pour des utilisateurs finaux.

Ouzizi (2005) complète cette définition en précisant que l'entreprise étendue est un cas particulier de chaîne logistique, caractérisée par l'existence d'un leader de la chaîne ou donneur d'ordres (un nœud du réseau d'entreprises constitue le pivot).

Terzi (2005) propose un point de vue qui s'articule suivant trois axes: stratégique, organisationnel et technique. Ainsi, le PLM est une approche intégrée qui utilise les technologies de l'information pour permettre la gestion collaborative des données numériques relatives au produit, au cours de toutes les phases de son cycle de vie. Le PLM implique :

- un point de vue stratégique, selon lequel le produit est considéré comme le seul créateur de valeur pour l'entreprise ;
- un axe organisationnel à l'aide d'une approche collaborative permettant la mise en commun de toutes les compétences de l'entreprise, distribuées parmi différents acteurs ;
- un axe technique par l'adoption de solutions informatiques. En effet, les informations sur les produits et les processus sont dispersées dans divers systèmes d'information, qui, jusqu'ici, étaient isolés et non interopérables (par exemple un système PDM (*Product Data*

Management) et un ERP (*Enterprise Resource Planning*). Les tendances actuelles concernent l'intégration de ces «îlots» dans un unique (même s'il est distribué) entrepôt de données intégré, afin d'assurer une utilisation plus large et plus efficace des informations relatives aux produits.

Le PLM est soutenu par des systèmes d'informations et des logiciels. Il doit permettre la circulation des informations entre les différentes applications métiers (Figure I.8).

L'interopérabilité et la modularité deviennent alors fondamentales pour qu'un maximum d'applications de l'entreprise puisse interagir avec le système PLM (Dutta, 2005).

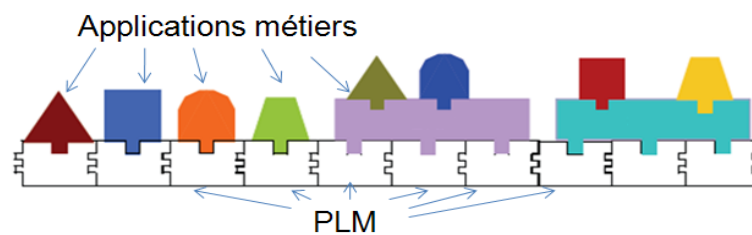


Figure I.8 : Principes du système PLM (Dutta, 2005)

Les systèmes PLM permettent d'encapsuler puis de diffuser les informations nécessaires à la définition du produit. Cela se fait par le biais de ponts entre le système PLM et les autres systèmes d'informations et applications de l'entreprise, tels la CAO, la FAO (*Fabrication assistée par ordinateur*), les logiciels de simulation, l'ERP, le SCM (*Supply Chain Management*). Il assure ainsi la traçabilité de l'information, son archivage et sa réutilisation (Le Duigou, 2010).

3.2. Objectifs du PLM

L'objectif du PLM est de permettre aux différentes entités de l'entreprise, de la production à la vente, de partager la connaissance des différents stades du cycle de vie d'un produit (conception, fabrication, stockage, transport, vente, service après-vente, recyclage) (Malaval et Bénaroya, 2009).

Le développement de produits est devenu un processus extrêmement complexe et difficile ; les industriels se trouvent confrontés à la nécessité de comprendre pleinement l'impact des modifications proposées aux différentes étapes du développement. Grâce au PLM, on aura une meilleure circulation de l'information dans l'entreprise ainsi une prise en compte en amont des contingences liées aux évolutions du produit.

L'approche PLM fournit un environnement collaboratif global dont l'objectif est de concevoir des produits virtuellement, de gérer leur cycle de vie et de simuler les processus de fabrication pour les produire. Il n'est désormais plus nécessaire de construire ni de tester des prototypes réels coûteux, ce qui permet d'économiser des ressources et d'améliorer le temps de mise en marché des produits. Un aperçu de la contribution du PLM aux enjeux d'entreprise est esquissé dans le tableau I.1 :

Tableau I.1 : Contributions du PLM aux enjeux de l'entreprise (Adaptée de (Debeacker, 2004))

Contributions du PLM aux enjeux de l'entreprise
<p>Réduire les délais de conception</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ingénierie simultanée • Partage du design avec clients/fournisseurs • Modélisation des fonctionnalités • Standardisation des composants • Réduction des phases de prototypage
<p>Augmenter la fiabilité du design</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aide à la conception et à la simulation • Partage d'expertise • Partage d'information avec les fournisseurs
<p>Augmenter la qualité de service, réduire les coûts de la chaîne logistique</p> <ul style="list-style-type: none"> • Visibilité des impacts sur la chaîne logistique • Prise en compte des contraintes de la chaîne logistique dans la conception
<p>Créer une relation de partenariat avec ses clients/fournisseurs</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conception modulaire • Communication externe autour du futur produit
<p>Réduire les coûts de conception</p> <ul style="list-style-type: none"> • Partage des coûts de conception avec ses fournisseurs • Réduction du nombre de prototypes

Par ailleurs, le PLM se limite aux informations liées au produit, certes en interconnexion avec d'autres dispositifs de management des données, mais se focalisant sur le management de ces informations tout au long de la vie du produit (Abbassen, 2007).

2.5. PLM : solution technologique

Même si, dans cette thèse, nous utilisons le concept de PLM en tant que approche et stratégie d'entreprise, nous ne nous empêcherons pas de donner un aperçu sur le PLM en tant que solution technologique.

En effet, le terme PLM désigne la solution logicielle sur laquelle s'appuie la démarche d'entreprise

qui a pour but d'assurer la gestion, la circulation, le partage et l'utilisation de l'ensemble des informations liées au produit tout au long de sa durée de vie. Dans le milieu industriel, le terme PLM est apparu un peu avant 2000 sur le marché logiciel.

Nous nous intéresserons dans cette partie aux définitions données par les éditeurs de logiciels principalement issus du monde de la CAO. Selon (CIMdata, 2009), l'ensemble du marché PLM, au niveau mondial, connaîtrait un taux de croissance annuel composé de 6,3 %, pour atteindre environ 35 milliards de dollars en 2013. Cinq éditeurs se partagent le marché : Dassault Systèmes (CATIA V6 PLM), Siemens (Siemens PLM), PTC (Windchill), SAP (SAP PLM) et Oracle (Agile), cités dans l'ordre décroissant de leurs parts de marché (Paviot, 2010).

Dassault Systèmes (2013) propose la définition suivante : le PLM est une stratégie d'entreprise qui aide les entreprises à partager les données produit, à appliquer des procédés communs et à capitaliser les informations de l'entreprise pour le développement de produits, de la conception à la mise au rebut, et dans tous les segments de l'entreprise étendue. En incluant tous les acteurs (collaborateurs de l'entreprise, partenaires, fournisseurs, équipementiers et clients), la gestion du cycle de vie du produit permet à ce réseau de fonctionner en tant qu'entité unique de la conception à la fin de vie.

Pour Siemens (2013), le PLM permet à l'entreprise de prendre des décisions cohérentes et pilotées par les systèmes d'information, à chaque phase du cycle de vie du produit. Les solutions PLM mettent en place une plateforme intégrée pour :

- Optimiser les relations au travers de toutes les phases du cycle de vie et de toutes les organisations impliquées ;
- Maximiser dans le temps la valeur du portefeuille de produits ;
- Mettre en place un système unique pour l'enregistrement et la diffusion des données numériques.

Selon PTC (2013), la gestion du cycle de vie des produits est une technologie qui permet de faire évoluer les informations techniques du concept au retrait et qui, ce faisant, représente un avantage certain pour l'entreprise. Le PLM est une application fondamentale dans l'industrie manufacturière, il permet aux responsables et aux ingénieurs de concevoir, tester, mettre à jour et perfectionner chaque détail du produit physique alors qu'il est encore au stade numérique.

Comme le PLM définit les nomenclatures, il détermine l'efficacité de l'ERP et des activités de toute la chaîne logistique. Les solutions ERP ne sont pas conçues pour gérer la complexité et la nature dynamique des données techniques. Elles doivent attendre la fin de la conception pour pouvoir partager des informations avec les services en aval ou les fournisseurs.

Pour SAP (2013), les logiciels PLM vendus permettent aux entreprises clientes de :

- Créer et proposer des produits innovants répondant ou générant de la demande ;
- Optimiser les processus et systèmes de développement de produit pour une mise sur le marché plus rapide ;
- Être plus flexible par rapport aux concurrents, être capable de réagir et de tirer partie des opportunités du marché.

Enfin, d'après Oracle (2013), les solutions PLM permettent aux entreprises d'accélérer l'innovation et de maximiser la rentabilité du produit par la gestion de l'information, des processus et des décisions concernant le produit, tout au long de son cycle de vie.

2.6. Fonctionnalités du PLM

Les principaux éditeurs de solutions PLM s'accordent sur les fonctionnalités essentielles du PLM, présentées dans la figure I.9 :

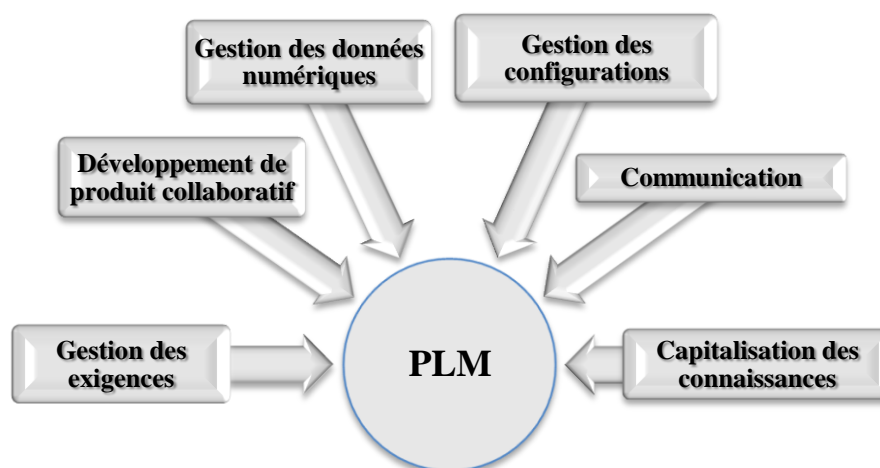


Figure I.9 : Fonctionnalités du PLM

- Gestion des exigences : Elle comprend la définition des spécifications du produit. Cette discipline a pris de l'importance vu que les activités de développement de produits

concernent tous les partenaires de l'entreprise étendue (McKay et al., 2001 ; Roy et al., 2005). Une gestion efficace des exigences nécessite la prise en compte des besoins des parties prenantes depuis le début d'un nouveau développement. En outre, l'évolution des exigences doit être contrôlée (Nilsson et Fagerstrom, 2006). En ce sens, la gestion dynamique des exigences comprend le suivi de l'évolution des besoins tout au long du cycle de vie du produit et l'identification des impacts des changements (Schuh, 2008).

- Développement de produit collaboratif : Les équipes internes d'une entreprise étendue (ventes, marketing, bureau d'études, fabrication et service clientèle) sont souvent éloignées géographiquement. La méthodologie collaborative permet de fédérer ces équipes, en y associant les fournisseurs, les sous traitants et les clients. Ainsi, elle capture itérativement les données créatives et identifie les problèmes, au plus tôt lorsque les modifications sont faciles à apporter (Debaecker, 2004).
- Gestion des données numériques : Cette gestion collecte et contrôle toutes les formes de données numériques du produit, pour permettre aux différents acteurs du projet de travailler simultanément sur la même innovation, tout en assurant une meilleure réutilisation (Marin, 2009).
- Gestion des configurations : Elle planifie et contrôle les versions, la structure, et la corrélation entre les informations venant de sources différentes. Cela est important pour les développements de produits complexes évoluant rapidement. Le contrôle des configurations, prend en charge l'identification, le contrôle et la vérification des caractéristiques physiques et fonctionnelles des composants du produit, appelés éléments de configuration (ISO 10007, 2003).
- Communication : Elle favorise une prise de décision opportune et efficace de la part des intervenants internes et externes. Elle permet de fournir, de manière dynamique, la définition du produit, aux destinataires voulus, dans le format voulu (Grieves, 2006).
- Gestion des connaissances : Elle vise à faciliter la capitalisation du savoir-faire diffusé dans l'entreprise, son accès et son exploitation, notamment sa réutilisation. Il s'agit d'améliorer les processus et les activités de l'entreprise. Un des processus les plus

demandeurs pour cette réutilisation du savoir et du savoir-faire est la conception de produit (Louis-Sidney, 2011).

2.7. Synthèse sur le PLM

Cette section a mis en lumière la difficulté de caractériser l'approche PLM et de choisir une définition consensuelle. Toutefois, nous retenons les points suivants :

- Le PLM peut être approché comme une démarche qui permet la gestion, la diffusion et l'utilisation de l'information définissant le produit ;
- Il focalise sur le produit et le développement d'une collaboration efficace dans un contexte d'entreprise étendue ;
- Il s'étend de la conception du produit à sa fin de vie ;
- Il s'appuie sur des solutions logicielles (systèmes d'information PLM).
- Le PLM permet de simuler virtuellement la vie complète du produit et de son environnement. Dans ce sens, il permet de prendre en compte les contraintes de la chaîne logistique dès la phase de conception.

Le rythme accru des échanges, des temps de mise sur le marché des produits a entraîné la remise en cause des modes de fonctionnement entre métiers et partenaires pour créer un produit mais aussi pour l'industrialiser, le produire, le distribuer et optimiser, au-delà de la chaîne de conception, l'ensemble de la chaîne logistique.

4. Chaînes logistiques

De nos jours, les entreprises doivent s'adapter à la dynamique du marché pour espérer survivre dans un environnement très concurrentiel et très compétitif. Les clients sont beaucoup plus exigeants en raison des nombreux choix qui s'offrent à eux. La satisfaction des clients combinée à la réduction des coûts est difficile à réaliser. Ajoutons à cela les nouvelles technologies de l'information et de la communication qui ont révolutionné la manière avec laquelle doivent être gérées les entreprises.

Aujourd'hui, aucune entreprise ne peut ignorer que la gestion de production classique laisse la place à la gestion de la chaîne logistique pour faire face aux nouvelles attentes du marché, aux nouveaux concurrents, nouveaux liens entre les entreprises et leurs partenaires. La globalisation

étant devenue une réalité, la concurrence n'est plus entre entreprises mais entre chaînes logistiques (Routroy, 2009).

4.1. Définition d'une chaîne logistique

Il existe une multitude de définitions de la chaîne logistique, il n'y a pas une définition universelle de ce terme (Christopher, 1992 ; La Londe et Masters, 1994 ; Ganeshan et al., 1998 ; Rota-Franz, 1998 ; Lummus et Vokurka, 1999 ; Tayur et al., 1999 ; Stadler et Kilger, 2000 ; Mentzer et al., 2001 ; Génin, 2003).

Certaines définitions adoptent un point de vue « produit » et d'autres, un point de vue « entreprise » ou encore « processus » (Gruat-La Forme, 2007). Cependant, elles reprennent un certain nombre d'idées communes :

- Une chaîne logistique se rapporte généralement à un produit fini ou à une famille de produits finis donnés.
- Elle fait intervenir plusieurs entreprises, plusieurs acteurs.
- Ces entreprises sont liées entre elles par trois flux : le flux d'information, le flux physique et le flux financier.
- Chacune des entités partenaires assure les fonctions d'approvisionnement, de transformation / production, de distribution ou de vente.

Une chaîne logistique est ainsi vue comme un système de fournisseurs, de producteurs, de sous-traitants, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent des flux matériels de l'amont vers l'aval, des flux d'informations dans les deux sens (New, 1997 ; Tayur et al., 1999), et des flux financiers de l'aval vers l'amont (Christopher, 1998 ; Stadler, 2005).

Ces chaînes logistiques existent aussi bien dans les organisations de service que dans celles de production (Ganeshan et Harrison, 1995).

Il existe également une vision plus opérationnelle de la chaîne logistique qui souligne davantage les processus d'une chaîne logistique. La chaîne logistique est alors définie comme un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers les clients (Lee et Billington, 1993).

Le terme installation peut correspondre à un fournisseur, une unité de production, une unité de stockage, un centre de distribution, un entrepôt ou un client. Le lien entre les différentes installations se fait par des opérations de transport (Hadj-Hamou, 2002). Cette définition structure la chaîne logistique autour d'un produit fini et de ses composants en se focalisant sur les fonctions nécessaires à sa production.

Comme illustré par la figure I.10, 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 (ou maillon) 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.

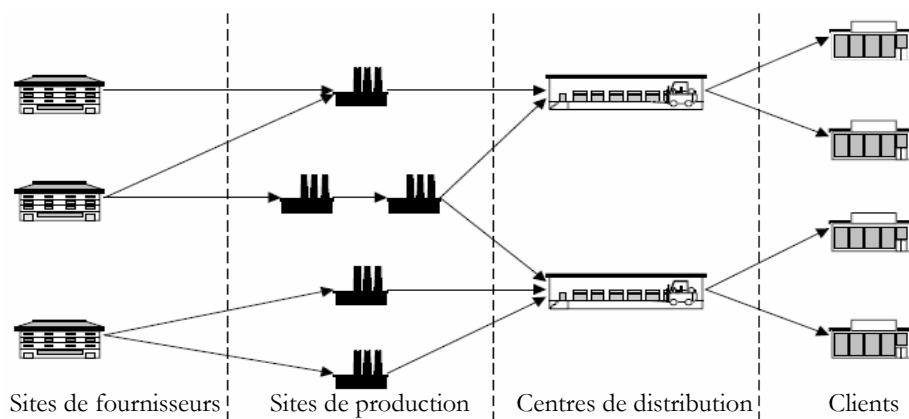


Figure I.10 : Représentation d'un réseau logistique (Mouloua, 2007)

Enfin, certains travaux insistent davantage sur la finalité d'une chaîne logistique en introduisant la notion de performance ; cette performance étant principalement caractérisée par la satisfaction du client final. Une chaîne logistique est alors définie comme un réseau global d'organisations qui coopèrent pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des flux de matières et d'informations entre les fournisseurs et les clients (Gruat La Forme, 2007). Fenies et Gourgand (2004)

complètent cette vision de la chaîne logistique en distinguant la performance collective (optimisation globale du fonctionnement de la chaîne logistique) et la performance individuelle (maximisation des profits d'une entité).

4.2. Activités d'une chaîne logistique

Parmi les principales fonctions des chaînes logistiques, nous distinguons :

- L'approvisionnement : Celui-ci constitue un moyen potentiel pour améliorer la qualité des produits fabriqués en réduisant leurs coûts et par conséquent leurs prix. Les matières et les composants approvisionnés constituent 60% à 70% de coûts des produits fabriqués dans presque toutes les entreprises (Ouzizi, 2005). Les délais de livraison des fournisseurs et la fiabilité de la distribution influent plus que le temps de production sur le niveau de stock ainsi que le niveau de service de chaque fabricant (Harmon, 1992).
- La production : Le processus de production concerne l'ensemble des transformations que vont subir les composants pour réaliser les produits finis. Il peut s'agir de fabrication ou d'assemblage des produits semi-finis.
- Le stockage : Des entrepôts ou des zones de stockage peuvent être nécessaires le long de la chaîne pour donner de la souplesse dans la production.
- La distribution et le transport : Au niveau des chaînes logistiques, les problèmes de distribution et de transport sont vus sous plusieurs angles. Certaines recherches ont étudié le problème de cheminement des véhicules au sein de la chaîne en essayant d'optimiser les circuits qu'ils peuvent suivre, d'autres se sont concentrés sur les moyens de transport qui optimisent la distribution. D'autres s'intéressaient aux quantités de produits qui doivent être distribuées aux clients et à la stratégie minimisant les coûts de transport et de stockage sur l'ensemble de la chaîne.
- La vente : Il s'agit d'unités de distribution et de vente des produits. Le processus vente, mis en œuvre par le service commercial, développe les relations envers le client (négociation des prix et des délais, enregistrement des commandes, ...) et par extension, recherche une meilleure connaissance du marché.

Les activités de la chaîne logistique sont également explicitées dans le modèle SCOR (the Supply Chain Operations Reference model), modèle de référence du Supply Chain Council (Supply chain Council, 2006), où l'on distingue cinq processus (figure I.11) :

- Planifier : qui correspond à la mise en adéquation des capacités avec la demande ;
- Approvisionner : qui regroupe l'ensemble des actions qui concourent à la mise à disposition de matière ;
- Fabriquer : qui contient l'ensemble des actions de transformation du produit ;
- Distribuer (ou livrer) : qui correspond à l'ensemble des étapes qui permettent de livrer le produit conformément à la demande (gestion des commandes, stocks, transport,...) ;
- Retourner : qui regroupe les activités de pilotage des flux de retour des produits.

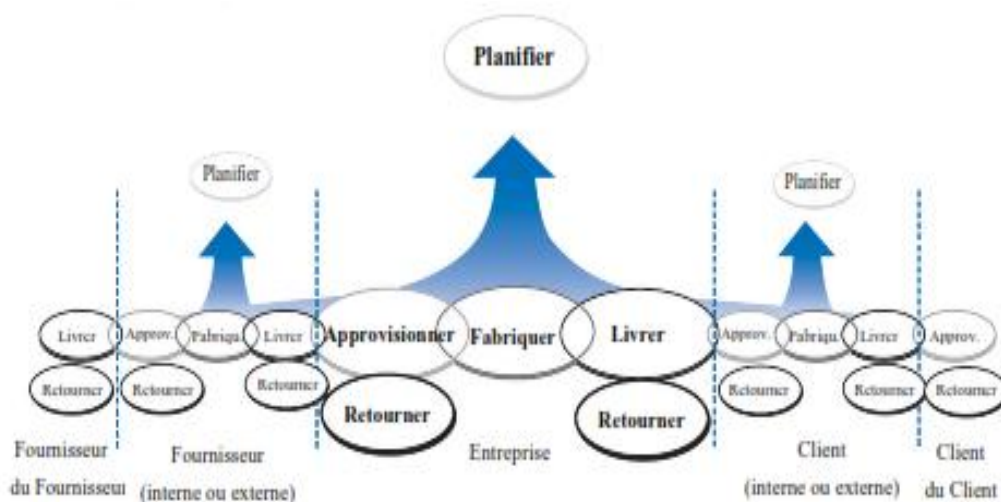


Figure I.11 : Description de la chaîne logistique par le modèle SCOR (SCOR, 2005)

4.3. Flux de la chaîne logistique

Les entreprises appartenant à une même chaîne logistique sont reliées par des flux physiques, des flux financiers et des flux d'information.

4.3.1. Le flux physique

Les flux physiques décrivent les matières qui circulent entre les différents maillons de la chaîne. Ces matières peuvent être des composants, des produits semi-finis, des produits finis ou des pièces de rechange. Ces flux constituent le cœur d'une chaîne logistique, sans lesquels les autres flux n'existeraient pas (Merzouk, 2007).

4.3.2. Le flux financier

Les flux financiers constituent les échanges de valeurs monétaires. Ces flux sont créés avec les différentes activités que subissent les flux physiques, tel que la production, le transport, le stockage, le recyclage, etc. Ils sont également utilisés comme un indicateur de performance du fonctionnement de ces activités (Akbalik, 2006).

4.3.3. Le flux d'information

Le flux d'information représente l'ensemble des transferts ou échanges de données entre les différents acteurs de la chaîne logistique. Il s'agit en premier lieu des informations commerciales, notamment les commandes passées entre clients et fournisseurs. Une commande comprend généralement la référence du produit, la quantité commandée, la date de livraison souhaitée et le prix éventuellement négocié lors de la vente, etc. Mais les entreprises s'échangent aussi des informations plus techniques : paramètres physiques du produit, gammes opératoires, capacités de production et éventuellement de transport, informations de suivi des niveaux de stock. Ces dernières sont de plus en plus réclamées par les clients qui souhaitent connaître l'état d'avancement de fabrication de leur produit (Messadia, 2008).

Le flux d'information est de plus en plus rapide grâce aux progrès des TIC (*Technologies de l'Information et de la Communication*).

Traditionnellement, l'enchaînement des flux d'information et des flux de matière est ordonné et séquentiel comme le suggère la figure I.12.

Aujourd'hui, les flux d'information ne suivent plus cette forme linéaire depuis le fournisseur jusqu'au client.

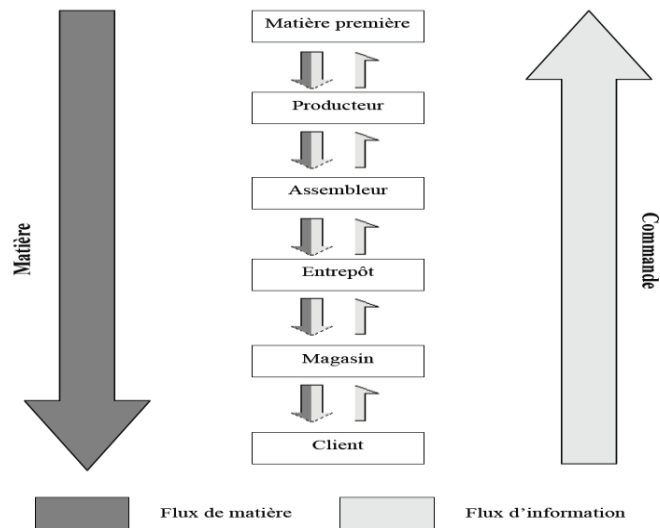


Figure I.12 : Découpage traditionnel des flux de matière et d'information dans la chaîne (inspirée de (Greis et Kasarda, 1997))

L'évolution du concept de la chaîne logistique, justifiée par une prise de conscience des industriels que les démarches d'amélioration des performances à l'intérieur de la firme dépendaient des performances de leurs partenaires, ainsi que l'émergence des nouvelles technologies de l'information et de la communication facilitant l'échange entre l'ensemble des partenaires, ont produit un changement au niveau de l'organisation des flux de la chaîne logistique (Monteiro, 2001 ; Giard, 2003).

Les flux d'information ressemblent aujourd'hui plutôt à un échange simultané, surtout grâce à des échanges électroniques entre l'ensemble des partenaires (figure I.13). Cette répartition s'inscrit bien dans le cadre de notre contexte PLM.

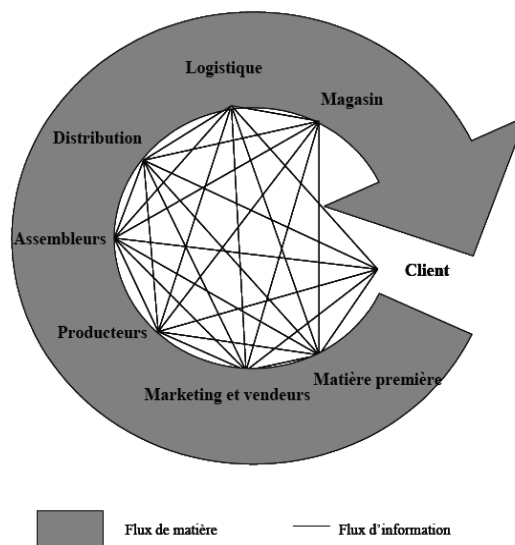


Figure I.13 : La nouvelle répartition des flux dans la chaîne logistique (inspirée de (Greis et Kasarda, 1997))

4.4. 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 produits. Elle vise d'une part à fabriquer les produits 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 des différents partenaires de la chaîne et la coordination des différents flux de matières, d'information et financiers. Le SCM (*supply chain management*) a pour premier objectif d'éliminer les barrières qui limitent la communication et la coopération des différents membres d'une chaîne logistique (Fawcett et Magnan, 2000 ; Müller, 2003).

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 (Taratynava, 2009).

Les problématiques principales dans la gestion de la chaîne logistique peuvent être classifiées en deux grandes catégories (Swaminathan et Tayur, 2003) : la configuration (orientée conception) ; la coordination (orientée gestion des opérations). La configuration correspond plutôt aux fondements basiques sur lesquels une chaîne logistique se construit et la coordination correspond à l'exécution présente de la chaîne logistique.

La structure de la chaîne logistique se caractérise par le nombre, la localisation, la taille, la mission et le mode de fonctionnement des différentes entités qui la constituent. Le problème de conception de chaînes logistiques peut-être un problème de localisation-allocation (Dejax, 2001) ; localisation se référant à la situation géographique (choix des fournisseurs, des sites de fabrication, de distribution,...) et allocation pour déterminer les activités affectées à chaque site (optimisation des flux échangés entre les sites). Le problème de la capacité, quant à lui, a pour objectif de déterminer la capacité qui devrait être ajoutée ou supprimée à chaque entité pour mieux satisfaire la demande (Simchi-Levi et al., 2003).

4.5. Décisions relatives à la gestion de la chaîne logistique

Les décisions relatives à la gestion de la chaîne logistique sont nombreuses et couvrent les différents horizons de la prise de décision.

D'après (Fleischmann et al., 2000), les différentes décisions peuvent être représentées par deux dimensions majeures. La première correspond aux activités du processus à mettre en place (approvisionnement, production, distribution et vente) tandis que la deuxième reflète les trois niveaux décisionnels à savoir long, moyen et court terme (figure I.14).

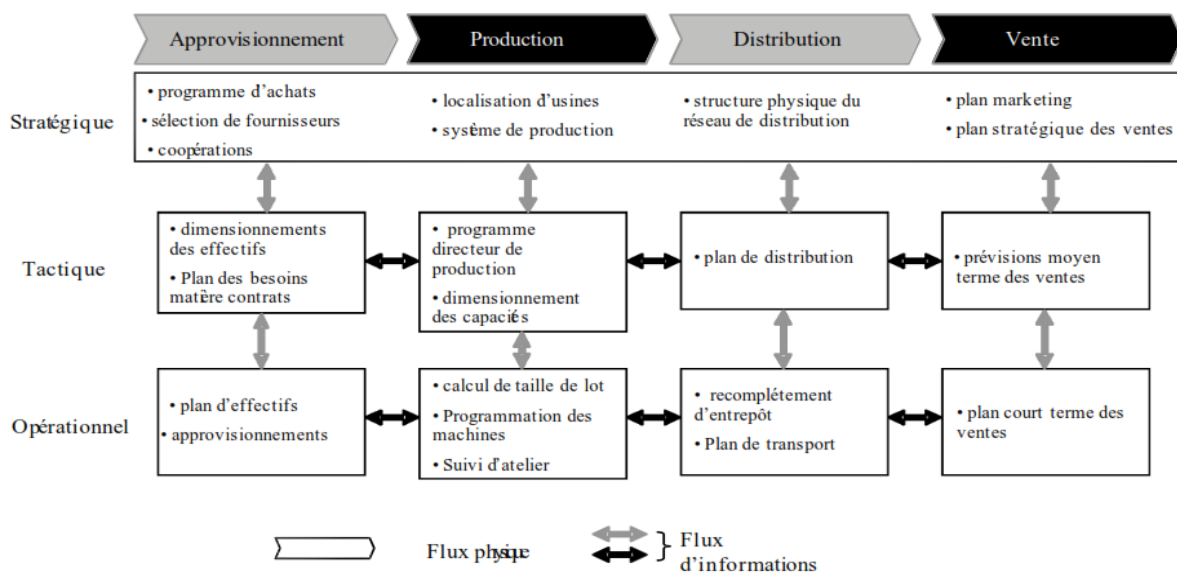


Figure I.14 : Décisions relatives à la gestion de la chaîne logistique (Fleischmann et al., 2000)

4.5.1. 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 (Dejax, 2001).

Il s'agit en particulier de la conception ou de l'adaptation de la structure industrielle et logistique (choix des implantations, sélection des fournisseurs, dimensionnement des capacités des sites, affectation des familles d'articles aux sites), de la définition des politiques d'approvisionnement, de production, de distribution et de transport.

Les autres niveaux de planification interviennent lorsque la chaîne logistique est implantée, les

partenaires sont connus, la localisation des sites de production est établie et le réseau de distribution est déterminé.

4.5.2. 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).

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 (Gélin, 2003).

4.5.3. Décisions opérationnelles

Les décisions opérationnelles assurent, à court terme, la gestion des moyens de la chaîne logistique au sein de chaque maillon et entre les différents maillons. 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.

4.6. Gestion centralisée/ décentralisée de la chaîne logistique

La gestion de la chaîne logistique peut être effectuée selon deux modes : un mode décentralisé dans lequel chaque maillon de la chaîne logistique optimise ses coûts indépendamment du reste et un mode centralisé dans lequel l'optimisation des coûts est un objectif global (Baboli et al., 2008).

4.6.1. Mode centralisé

La centralisation peut être considérée comme le mécanisme le plus puissant pour coordonner les décisions dans l'organisation (Costa-Affonso, 2008). Toutes les informations et les contraintes des différentes entités sont prises en compte, et toutes les décisions sont prises en compte dans

une même structure, ce qui permet d'assurer la cohérence des décisions et d'atteindre de meilleurs résultats par rapport aux objectifs globaux de la chaîne logistique (Sahin et Powell, 2005). Toutefois, ce mode de gestion présente quelques inconvénients.

Tout d'abord, le mode centralisé requiert une totale transparence des entités, avec un fort échange d'information. Or, certaines de ces informations, comme les coûts ou la capacité, sont souvent considérées comme confidentielles par les membres de la chaîne logistique.

Pour que ce type de coordination fonctionne, il est important de s'assurer que la structure centrale sera capable de regrouper toutes les informations nécessaires à toutes les prises de décisions. Stadler (2005) insiste sur le fait que si les partenaires hésitent à partager leurs informations et à les rendre disponibles dans une structure centralisée, la coordination centralisée ne sera plus possible. De plus, traiter toutes les informations est un processus lourd, qui peut demander beaucoup de temps (Costa-Affonso, 2008).

Nous pouvons ajouter également que l'approche centralisée impose aux acteurs d'être prêts à respecter les décisions prises par l'entité de coordination. Les entreprises doivent donc accepter de perdre une partie de leur autonomie de décision. Considérant un contexte réel où les entreprises font souvent partie de plusieurs chaînes logistiques à la fois, cette hypothèse devient peu applicable (Monsarrat, 2004).

Une autre question souvent posée sur ce mode de coordination est relative au partage des bénéfices entre les entités de la chaîne. Dans des cas limites, une maximisation globale du profit peut impliquer un travail "à perte" pour une ou plusieurs entités du réseau. Il est donc important de définir comment le profit global sera partagé entre les partenaires (Kim, 2000 ; Romano, 2003).

4.6.2. Mode décentralisé

Le mode décentralisé peut représenter une coordination plus viable et moins lourde, car chaque entité garde son autonomie. Ce mode de prise de décision permet à l'organisation de répondre rapidement à l'évolution des conditions locales, étant donnée la vitesse de regroupement des informations nécessaires à la prise de décision par rapport au mode centralisé (Mintzberg, 1982).

La volonté d'échange d'information reste le point clé pour réussir une coordination décentralisée

efficace. Cela permettra une meilleure collaboration des partenaires de la chaîne, tout en gardant une plus grande autonomie. L'importance de ce partage d'information a été citée par de nombreux auteurs (Bourland et al., 1996 ; Chen, 1996 ; Lee et Whang, 1998 ; Zhao et al., 2002).

Kok et Fransoo (2003) mettent en avant le caractère décentralisé de la gestion des chaînes logistiques, tout en soulignant l'importance de développer et d'utiliser des modèles décentralisés. En effet, ces modèles permettent d'une part, de diminuer les quantités de données à traiter dans chaque processus de résolution et d'autre part, de préserver les contraintes d'autonomie locales qu'un modèle centralisé peut enfreindre en rassemblant les données de différents acteurs.

L'importance de garder l'autonomie de chaque entité fait que beaucoup d'auteurs s'intéressent au mode de coordination décentralisée, bien que, dans une chaîne logistique comme dans tout autre système, une optimisation globale donne des résultats plus performants qu'un système d'optimums locaux (Lee, 2007).

4.7. Etat de l'art sur la conception des chaînes logistiques

Dans la littérature, plusieurs travaux ont traité le problème de conception des chaînes logistiques. Nous pouvons distinguer les approches analytiques : en effet, les modèles mathématiques sont très utilisés pour la conception des chaînes logistiques et pour l'optimisation des coûts. Ils consistent à modéliser un système réel par un ensemble d'équations exprimant les contraintes et les objectifs. Parmi ces travaux, nous citons (Arntzen et al., 1995 ; Jayaraman et Pirkul, 2001 ; Vidal et Goetschalckx, 2001 ; Jolayemi et Olorunniwo, 2004).

L'inconvénient des modèles mathématiques est qu'ils font des restrictions trop importantes sur certaines hypothèses. Un autre inconvénient, et pas des moindres, est le temps d'exécution nécessaire pour résoudre des problèmes de taille réaliste.

Les approches de résolution proposées sont généralement validées sur des problèmes fictifs de petite taille ce qui ne garantit en rien que ces méthodes soient performantes (Riane et al., 2011). Ainsi, pour des problèmes avec de grandes tailles, les industriels préfèrent utiliser des solutions approchées obtenues dans des délais raisonnables (Mouloua, 2007).

D'autres travaux ont utilisé une approche d'optimisation basée sur la simulation pour la conception des chaînes logistiques (Van der Vorst et al., 2001 ; Lallement, 2004). Les modèles par simulation sont très pratiques dans le cas de systèmes où il est difficile de représenter toutes les

hypothèses par des équations, et de ce fait, on ne peut pas utiliser les modèles mathématiques. La plupart des travaux utilisant les approches de simulation sont dédiés à un cas industriel spécifique et se focalisent essentiellement sur le réseau de distribution.

4.8. Problèmes liés à la conception des 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, quelques problèmes liés à la conception d'une chaîne logistique.

4.8.1. Evolution de l'environnement

L'instabilité de l'environnement économique oblige les entreprises à être réactives en anticipant tout changement et 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 la réorganisation de toute la chaîne logistique,
- 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. Or, la demande aujourd'hui est de plus en plus incertaine. De ce fait, les fluctuations que subit la demande réelle remettent en cause la configuration des processus industriels.

4.8.2. Evolution des problèmes de production

Les nouvelles exigences ont entraîné au niveau de la production, des contraintes nouvelles de plus en plus difficiles à appréhender avec les outils de gestion classiques adaptés à une gamme plus stable et limitée de produits.

Multiplier les variantes, produire en un temps plus court, limiter les investissements financiers,

concevoir des produits compétitifs sur le plan de la qualité, autant d'objectifs souvent contradictoires auxquels les entreprises ont eu à faire face. Cette multiplicité des produits engendre des problèmes très complexes sur le plan de la gestion et au niveau de la planification.

4.8.3. Difficulté de mise en œuvre des méthodes classiques d'aide à la décision

L'hypothèse de base des méthodes d'aide à la décision est la possibilité d'optimiser une fonction économique sous un ensemble de relations entre variables et contraintes formalisables. A l'exception de situations industrielles très particulières, une telle hypothèse est réfutable, car tout problème de production est intrinsèquement multicritères, critères qui ont d'ailleurs l'inconvénient majeur d'être souvent contradictoires (Molet, 2006).

D'après ce même auteur, la complexité de la gestion des flux est telle que les modèles mathématiques ne peuvent donner, dans la plupart des cas, des résultats optimums dès que l'on aborde des données concrètes et que nous sommes confrontés à des situations incertaines, aléatoires et combinatoires, c'est à dire celles de la plupart des entreprises, même de taille réduite.

4.9. Pistes de solutions abordées

Pour résoudre les problèmes liés à la conception d'une chaîne logistique, nous abordons dans cette section des pistes de solutions qui seront exploitées dans la suite de cette thèse.

4.9.1. Réactivité de la chaîne aux changements

Une stratégie de chaîne logistique basée sur la flexibilité et la rapidité est la meilleure approche pour gérer la pression croissante que subissent les chaînes logistiques mondiales. Aujourd'hui, les chaînes logistiques qui ne sont pas suffisamment maniables s'exposent à des conséquences radicales (Christopher, 2000).

De plus, l'agilité (capacité à réagir rapidement aux changements non prévisibles de la demande), ne doit pas être considérée comme un concept applicable exclusivement à l'intérieur des organisations. Il faut le voir dans un cadre plus large, carrément sur l'ensemble de la chaîne logistique. Par exemple, les fournisseurs ont une grande influence sur les délais des entreprises, et donc sur la mesure dans laquelle ces entreprises sont capables de réagir rapidement aux circonstances changeantes du marché.

4.9.2. Définition intégrée de la chaîne logistique

La recherche d'une structure optimale de la chaîne logistique passe par la prise en compte de toutes les contraintes relatives aux différents processus d'approvisionnement, de production et de distribution.

Une approche 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 (Hadj Hamou, 2002). Cela nécessite la collaboration de l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique et la synchronisation des flux de produits et d'informations, notamment par l'intégration des systèmes d'informations des différents partenaires.

4.9.3. Conception du produit et de sa chaîne logistique

La phase de conception du réseau logistique doit se faire en interaction avec le processus de conception de produits. D'une part, les contraintes de la chaîne logistique doivent être intégrées dans la phase de conception du produit. D'autre part, les spécificités du produit doivent être considérées pour déterminer la structure du réseau logistique. La chaîne logistique doit être flexible et réactive aux éventuelles reconceptions des produits.

5. Positionnement de notre thèse

Nous nous intéressons dans cette thèse aux problèmes de configuration (conception) des chaînes logistiques. Nous nous limiterons dans cette thèse aux décisions stratégiques voire tactiques pour la conception de la chaîne logistique.

Nous retenons pour la suite de nos travaux, le mode de gestion décentralisé où chaque maillon de la chaîne cherche à optimiser ses propres coûts. L'échange d'information ou un regroupement centralisé d'information sera la base de l'amélioration des résultats obtenus par une optimisation locale.

Nous utiliserons le PLM, comme approche stratégique de gestion des informations relatives au produit tout au long de son cycle de vie pour assurer la collaboration de tous les maillons de la chaîne logistique.

Nous avons présenté les modèles analytiques et les modèles de simulation traitant de la conception des chaînes logistiques avec tout ce qu'ils présentent comme limites. Nous utilisons dans cette thèse une approche hybride combinant modèles analytiques (mathématiques) et PLM pour l'optimisation des décisions de conception de la chaîne logistique.

Etant centré sur le produit, le PLM sera d'autant plus intéressant que notre objectif est la conception du produit et de sa chaîne logistique simultanément.

Conclusion

Deux grandes dimensions sont traitées dans cette thèse à savoir le PLM et l'optimisation des chaînes logistiques. Dans ce chapitre, nous avons défini quelques concepts liés à ces domaines de recherche et nous avons présenté un état de l'art des travaux les plus proches de notre étude afin de mieux positionner notre problématique.

La conception de la chaîne logistique doit être 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 d'où l'intérêt d'une conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique appropriée. Ainsi, la conception de la chaîne logistique commence à partir de la maquette numérique virtuelle.

Le PLM, en tant qu'approche stratégique, se basant sur les technologies de l'information pour la gestion collaborative des informations du produit tout au long de son cycle de vie, nous semble pouvoir répondre à cette problématique.

Nous focaliserons notre étude sur la phase de conception du produit sans pour autant négliger les autres phases du cycle de vie. En effet, celles-ci seront prises en compte dès la phase de conception.

Le chapitre qui suit, aura pour objectif de modéliser cette approche PLM. Nous présenterons ainsi le modèle PLM proposé permettant la gestion des informations du produit tout au long de sa chaîne logistique. Pour cela, nous exposerons, au préalable, une revue de littérature des langages de modélisation, notamment ceux spécifiques aux modèles PLM.

Chapitre 2 :
Modèle PLM intégrant cycle de
vie et chaîne logistique

Introduction

L'état de l'art sur le PLM a montré qu'il existe une multitude de définitions de ce concept. Bien que, selon les définitions précédentes, le PLM ne puisse être réduit à sa seule dimension logicielle, il se fonde grandement sur la notion de système d'information (SI).

Un système d'information est défini comme étant un ensemble de ressources organisées pour la collecte, le stockage, le traitement, la maintenance, l'utilisation, le partage, la dissémination, la mise à disposition, l'affichage ou la transmission d'informations (CNSS, 2006).

Nous rappelons par ailleurs la distinction entre donnée et information : Une donnée est le reflet symbolique de nombres, quantités, grandeurs ou faits. L'information est une donnée placée dans un contexte (Kemp, 1999). Lorsque l'on donne un sens à une donnée par le biais d'un système interprétatif, elle devient une information (Tsuchiya, 1993).

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps, les méthodes (et/ou langages) de conception de systèmes d'information et de modélisation d'entreprises. Par la suite, nous exposons quelques modèles PLM proposés dans la littérature. Dans un deuxième temps, nous présentons un modèle PLM adapté à notre contexte. Il s'agit d'un modèle PLM pour la gestion des informations du produit tout au long de son cycle de vie en intégrant les différents partenaires de sa chaîne logistique.

1. Méthodes de conception de systèmes d'information et de modélisation des entreprises

La modélisation est une démarche intellectuelle et scientifique qui permet d'approcher et de comprendre un système complexe en créant un modèle qui représente la réalité et qui doit être compréhensible par tous. C'est aussi une représentation abstraite et simplifiée (i.e. qui exclut certains détails), d'une entité (phénomène, processus, système, etc.) du monde réel en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir (Messaadia, 2008)

Un modèle d'entreprise est toujours associé à une finalité et il doit, suivant les besoins, être capable de prendre en compte les aspects structurels, fonctionnels et comportementaux (Vernadat, 1999).

Dans la conception des systèmes d'informations, il est devenu classique de modéliser le système d'information de l'entreprise comme un système (Alban et al., 1995). Dans ce sens, le système combine le flux de l'information produit par le fonctionnement de l'entreprise à l'occasion de son activité interne et de ses interactions avec l'environnement.

Dans ce qui suit, nous présentons quelques langages/méthodes de modélisation

1.1. Approches cartésiennes

On définit une approche cartésienne comme une approche pour laquelle tout objet ou système est expliqué par l'identification de sa structure interne (Monteiro, 2001).

Les approches cartésiennes permettent d'avoir un panel de granularité¹ assez étendu par rapport aux autres approches. En effet, celles-ci sont plus spécifiquement orientées vers un degré de précision dans la représentation de l'entreprise.

1.1.1. Réseaux de files d'attente

Les files d'attente sont nées avec la recherche opérationnelle (Gelembé, 1982). Les systèmes de production par leurs aspects flux et stock et par la présence d'éléments aléatoires comme l'arrivée d'une panne ou d'une demande de fabrication, sont un domaine où les réseaux de files d'attente trouvent leur place (Monteiro, 2001).

Une file d'attente (Figure II.1) peut illustrer, suivant les besoins de représentation, soit une machine au sein d'un atelier (approche microscopique), soit une unité de production au sein d'une chaîne logistique (approche macroscopique) (Baynat, 2000 ; Bollon, 2001). Ces outils de modélisation sont très appropriés pour la gestion des flux de matières, mais semblent difficilement adaptables à la gestion des flux d'informations (Benaïssa, 2008).

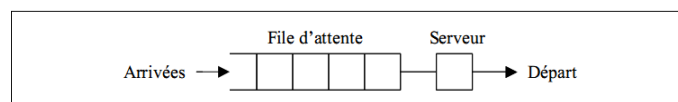


Figure II.1 : File d'attente simple

¹ La granularité se définit comme le degré de détail ou d'agrégation que possède une représentation.

1.1.2. Réseaux de Pétri

Cet outil, initialement développé pour l'étude des systèmes de communication par ordinateurs (Petri, 1962), a largement trouvé sa place dans l'étude des systèmes de production. Les principales propriétés pouvant être mises en évidence par les réseaux de Pétri (RdP) telles que la synchronisation, le parallélisme, les conflits et le partage des ressources se retrouvent dans les systèmes de production (David, 1992 ; Proth et Xie, 1995). Les RdP sont aussi un puissant outil graphique (Figure II.2), à la fois pour la représentation des phénomènes et des mécanismes séquentiels, et pour la modélisation des systèmes à événements discrets (Silva, 1996).

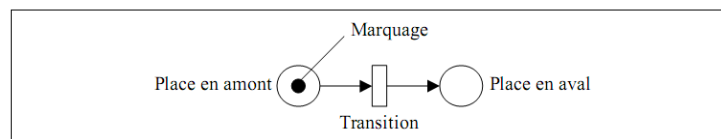


Figure II.2 : Eléments de représentation d'un Réseau de Pétri

La capacité d'agrégation des RdP permet une lisibilité graphique de haut niveau et une grande précision dans la représentation des processus. La possibilité de représentation de l'aspect « dynamique » d'un système est une caractéristique forte des RdP (Monteiro, 2001).

1.1.3. SADT (Structured Analysis Design Technique)

SADT est une méthode d'analyse et de conception et une technique de modélisation de l'activité pour l'analyse détaillée des processus, elle est basée sur un langage graphique standardisé (Ross, 1977 ; Lissandre, 1990). SADT permet l'analyse et la modélisation de systèmes à l'aide de deux formalismes : les datagrammes (diagramme des données : transformation informationnelle) et les actigrammes (diagramme des activités : transformation physique).

Le processus est décrit en termes d'entrées, sorties, contrôles et mécanismes. Les entrées sont les flux utilisés par l'activité ; elles peuvent être constituées de matière, d'information, etc. Les sorties sont les résultats fournis ainsi que des flux. Les contrôles sont les contraintes ou les commandes qui précisent le déroulement de l'activité. Les mécanismes sont les ressources humaines ou matérielles utilisées par l'activité.

Une composante principale de SADT est la décomposition hiérarchique des actigrammes, ce qui permet de détailler une activité d'un diagramme en élaborant un diagramme de niveau inférieur (Figure II.3).

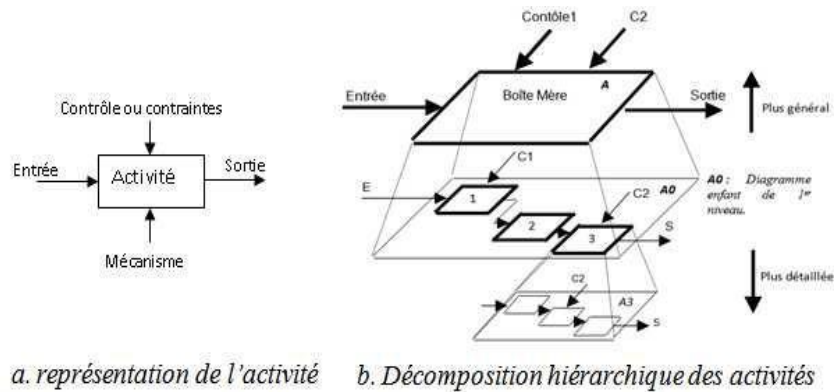


Figure II.3 : Formalisme de SADT (Vernadat, 1996)

Cet outil fournit une architecture de référence pour l'analyse d'entreprise permettant la gestion des ressources et des informations. Toutefois, SADT présente plusieurs points faibles : selon (Kim et al., 2003), SADT n'est pas approprié pour les modèles qui décrivent les comportements des objets de l'entreprise (personnes, logiciels et machines). Santarek et Buseif (1998) mettent l'accent sur l'aspect statique du diagramme SADT.

1.1.4. IDEFx (Integration DEFinition)

La famille des méthodes IDEFx a été développée dans le but d'offrir un ensemble d'outils complet pour l'analyse et la représentation des différents aspects d'un système (IDEF0, 1993).

Ces méthodes sont principalement utilisées pour décrire les différentes fonctions d'un système en modélisant sa structure, ses informations, ses processus, son organisation et son comportement (Kim et al., 2003).

Les langages les plus connus sont IDEF0, IDEF1 et IDEF3. Mais IDEF0 qui est un outil de modélisation fonctionnelle et organisationnelle développé à partir de SADT, est le langage le plus utilisé de la famille IDEFx (Bendriss, 2009).

1.1.5. SA-RT (Structured Analysis – Real Time)

Complémentaire de SADT, cette méthode, qui propose une prise en compte de l'aspect temporel, a été spécifiquement développée pour l'analyse et la conception de logiciels implantés sur des systèmes temps réel (Ward et al., 1985 ; Hatley et Pirbhai, 1987).

La méthode SA-RT possède des bonnes caractéristiques en ce qui concerne la représentation et la gestion des informations dans le temps. En revanche, elle demande une plus grande adaptation pour les flux physiques et leurs transformations, les processus de transformation étant au départ destinés exclusivement aux données.

1.2. Approches systémiques

Contrairement au principe des approches structurées qui se basent sur la dissociation et la décomposition des systèmes, les approches systémiques rassemblent et associent des différentes fonctions d'un système afin de prendre en compte l'ensemble d'une problématique de façon globale. Elles se focalisent plus sur l'interaction des systèmes et plus particulièrement sur l'analyse des flux (produits, informations ...) (Bendriss, 2009).

1.2.1. MERISE

La méthode Merise (Dionisi, 1995) a pour objectif la conception et la mise en place du système d'information d'une entreprise. Elle peut toutefois s'étendre à la conception du système physique. Cette méthode est basée sur la séparation des données et des traitements à effectuer en plusieurs modèles conceptuels et physiques. Elle utilise deux principaux formalismes : le MCD (Modèle Conceptuel de Données) et le MOT (Modèle Organisationnel des Traitements) (Tardieu et al., 1991). Elle est destinée aux systèmes structurés et stables.

De plus, sa finalité orientée base de données permet d'avoir une information qualitative et quantitative sur les données traitées dans l'organisation. Celle-ci permet une bonne prise en compte des flux d'informations, mais les flux de matières, bien que pouvant être gérés, ne sont pas complètement intégrés à la méthode. Les processus de transformation des produits et leurs contraintes (ressources et comportement) nécessitent une extension de cette méthode.

1.2.2. CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture)

L'architecture CIMOSA vise à unifier, dans un même formalisme, différents flux (matière, information, ...). Cette architecture comprend un cadre de modélisation, une plate-forme d'intégration et une méthodologie d'intervention (Vernadat, 1998 ; Vernadat, 1999). Le cadre de modélisation appelé « cube CIMOSA » est illustré par la figure II.4. Il s'articule autour de trois principes fondamentaux et orthogonaux. Les trois axes du cube sont :

* axe de généricité : il se compose de trois niveaux :

- un niveau générique qui correspond à la définition des primitives de base du langage de modélisation,
- un niveau partiel qui comprend les structures prédéfinies et réutilisables pour un domaine d'application,
- un niveau particulier qui inclut les modèles spécifiques de l'entreprise.

* axe des modèles : il est aussi appelé axe de dérivation. Il définit trois niveaux de modélisation :

- un niveau de définition des besoins durant lequel un cahier des charges est rédigé,
- un niveau de spécification de conception qui est l'analyse conceptuelle des solutions aux besoins exprimés,
- un niveau de description de l'implantation qui correspond à la description précise de la solution retenue.

* axe des vues : ou axe de génération qui définit l'entreprise selon quatre vues :

- les fonctions qui décrivent les fonctionnalités et le comportement de l'entreprise en termes de processus, d'activités et d'opérations,
- les informations,
- les ressources qui décrivent les moyens à mettre en œuvre pour réaliser les fonctions de l'entreprise,
- l'organisation qui correspond à la description des responsabilités et de l'autorité dans la prise de décision.

Chacune des vues de CIMOSA n'est pas indépendante des autres. Elles sont des filtres de lecture pour les informations contenues dans le modèle. Les modèles CIMOSA prennent en compte le

temps par le biais des dates d'occurrences des événements et des durées d'exécution des activités.

Contrairement aux autres méthodes de modélisation d'entreprise, CIMOSA ne préconise pas de formalisme graphique. Malheureusement, ce manque de représentation graphique n'a pas permis à CIMOSA de pénétrer dans le milieu industriel de la même manière qu'IDEF0 ou Merise (Benaïssa, 2008).

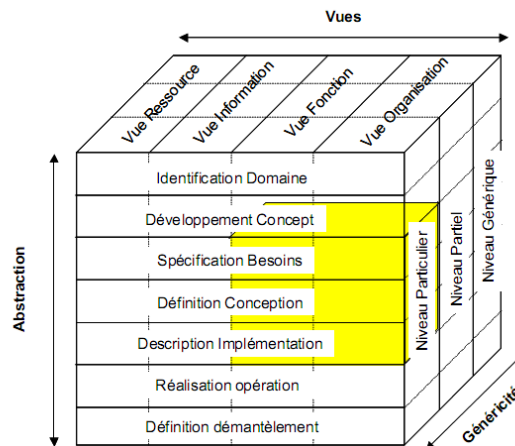


Figure II.4 : Cube CIMOSA (Vernadat, 1998)

1.2.3. PERA : Purdue Enterprise Reference Architecture

La méthodologie PERA a été fondée par le Purdue Consortium en 1994 (Williams, 1994). C'est une architecture en couches qui permet de modéliser l'aspect fonctionnel et informationnel d'un système. Elle prend en compte toutes les étapes du cycle de vie d'une entité industrielle, de sa conceptualisation à son opérationnalisation. PERA a été l'un des éléments fondateurs de GERAM (Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology).

1.2.4. GERAM : Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology

GERAM (GERAM, 1999) se propose comme un cadre global de référence pour l'élaboration d'une méthodologie de modélisation de l'entreprise utilisant des approches déjà existantes. Il est basé sur l'étude des architectures d'intégration d'entreprise CIMOSA et PERA.

GERAM définit les concepts génériques dont il faut tenir compte dans les projets de conception et d'intégration d'entreprise. Ces concepts sont classés dans (Sperandio, 2005) comme suit :

- les concepts relatifs aux ressources humaines, qui définissent le rôle de l'homme comme élément intégré à l'entreprise et ses activités tout au long du processus de conception ou de changement ;
- les concepts relatifs aux processus, qui permettent de décrire et de modéliser les processus d'entreprise ;
- les concepts relatifs à la technologie, qui décrivent les ressources utilisées pour l'exploitation et les projets de changement.

1.3. Approche « kénétique » : Les systèmes multi-agents

L'approche de modélisation « kénétique » est basée sur le paradigme d'intelligence artificielle distribuée. Cette approche, définie comme une évolution de la systémique se focalise sur le comportement des interactions des systèmes.

Les systèmes multi-agents constituent une approche de l'intelligence artificielle distribuée où l'expertise est distribuée sur un ensemble d'agents communiquant entre eux pour atteindre un objectif global (Huhns, 1987).

Un agent peut être défini comme une entité (physique ou virtuelle) capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, disposant d'une représentation partielle de cet environnement, pouvant communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents (Ferber, 1995). D'un point de vue pratique, un agent peut être un système informatique situé dans un environnement qu'il peut percevoir et sur lequel il peut agir, de manière autonome (Tranier, 2007).

Les techniques développées pour les systèmes multi-agents permettent la réalisation d'outils d'aide à la décision et à la coopération. Cette approche s'intéresse notamment à la représentation des connaissances, à la mise en place de protocoles de communication et à la construction de plans d'action. Le système multi-agents est essentiellement tourné vers le système d'information et son pilotage (Camalot, 2000).

1.4. Approches orientées objet

L'approche orientée objet consiste à modéliser le système par un ensemble d'objets qui dialoguent entre eux par envoi de messages.

1.4.1. UML (Unified Modelling Language)

Le langage unifié UML (Booch et al., 1999), appliquée dans le domaine de modélisation des systèmes d'information, est l'une des méthodes les plus connues à l'heure actuelle. Ce langage permet la modélisation d'un système selon différents diagrammes présentés dans la figure II.5.

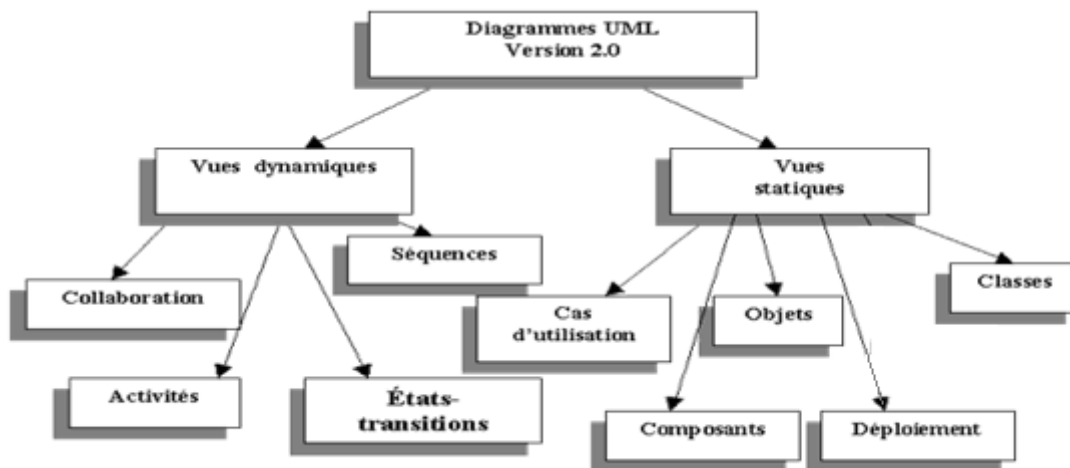


Figure II.5 : Les différents diagrammes d'UML (Sbibi, 2004)

Voici les principales caractéristiques de ces diagrammes :

- 1- Diagramme de cas d'utilisation : c'est une représentation des fonctions du système du point de vue de l'utilisateur. Il présente les acteurs, symbolisés par des petits personnages et les cas d'utilisation symbolisés par des ellipses.
- 2- Diagramme de classes : c'est une représentation de la structure statique en termes de classes et de relations. Il fait abstraction des aspects dynamiques et temporels. Dans un diagramme de classes, on distingue plusieurs types de relations entre les classes (association, héritage, composition, agrégation...).
- 3- Diagramme d'objets : c'est une représentation des objets et de leurs relations. Il correspond à un diagramme de collaboration simplifié sans présentation des envois de message.
- 4- Diagramme de composants : c'est une représentation des composants d'implémentation

et de leurs relations. Il s'attache à l'architecture logicielle d'une application en termes de modules.

- 5- Diagramme de déploiement : c'est une représentation du déploiement des composants sur les dispositifs des matériels. Il s'attache à l'architecture physique et matérielle.
- 6- Diagramme d'états-transitions : c'est une représentation du comportement d'une classe en termes d'états. Il visualise des automates d'états finis du point de vue des états et des transitions. Les transitions sont déclenchées par des instances d'évènements.
- 7- Diagramme de séquences : c'est une représentation temporelle des objets et de leurs interactions. Le diagramme de séquences permet de représenter des collaborations entre objets selon un point de vue temporel. On met l'accent sur la chronologie des envois de messages. Les diagrammes de séquences peuvent servir à illustrer un cas d'utilisation. L'ordre d'envoi d'un message est déterminé par sa position sur l'axe vertical du diagramme ; le temps s'écoule "de haut en bas" de cet axe. Les diagrammes de séquences représentent l'aspect dynamique du système modélisé.
- 8- Diagramme de collaboration : c'est une représentation spatiale des objets et de leurs interactions. Il montre les interactions entre les objets en insistant sur la structure spatiale statique qui permet la mise en collaboration d'un groupe d'objets.
- 9- Diagramme d'activités : c'est une représentation du comportement d'une opération en termes d'actions. Une activité représente l'exécution d'un mécanisme et le déroulement d'étapes séquentielles. Le passage d'une activité à une autre est matérialisé par une transition. Les transitions sont déclenchées par la fin d'une activité et provoquent le début immédiat d'une autre (elles sont automatiques). L'utilisation de ce diagramme est conseillée dans la présentation des mécanismes complexes.

UML fournit à la fois le cadre conceptuel et le langage commun : cadre conceptuel parce que l'approche objet permet d'unifier l'ensemble du processus de développement en supprimant la rupture entre la modélisation du domaine et la conception du système ; langage commun parce que UML est accepté et utilisé depuis l'organisation des processus jusqu'à l'exploitation des applications. Cette représentation s'appuie sur un découpage classique entre l'expression des concepts (approche fonctionnelle), la modélisation du domaine (approche conceptuelle) et la modélisation des collaborations (approche objet).

Bien qu'UML soit devenu un support de communication performant, permettant une représentation claire pour la description des systèmes, il n'est pas encore une méthode dans la mesure où il ne présente aucune démarche ou processus d'élaboration des modèles (Benaïssa, 2008).

1.4.2. UEML (Unified Enterprise Modelling Language)

UEML (Unified Enterprise Modelling Language) a pour objectif de proposer un ensemble clair de syntaxes et de sémantiques pour la modélisation en entreprise (Vernadat, 2001).

L'idée principale est de proposer un langage unifié pour la modélisation d'entreprises et non pas un langage capable de remplacer tous ceux préexistants (CIMOSA, GRAI,...). Dans un premier temps, UEML est destiné à être un langage facile à apprendre et à utiliser et qui serait une interface standardisée d'utilisation pour l'ensemble des outils existants. Dans un second temps, il permettra l'échange entre différents systèmes de modélisation d'entreprise.

Le nom UEML peut rappeler UML (Unified Modelling Language). Cependant, UEML et UML ne doivent pas être confondus. UML est un langage de modélisation objet principalement dédié aux systèmes d'information quoique largement applicables. Par contre, UEML est un langage spécialisé, dédié à la modélisation d'entreprise et en tant que tel, il est basé sur des concepts liés au monde de l'entreprise (par exemple : processus, activité, ressource, événement, ...) (Vernadat, 2001).

1.5. Synthèse

La modélisation d'entreprise abonde de langages, de méthodes et de modèles. Chaque outil ou méthode possède ses propres concepts et ses propres applications.

Une synthèse des principales méthodes abordées est présentée dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Synthèse des principaux outils de modélisation

Méthode	Type d'approche	Objectif et applications	Principales caractéristiques
Réseaux de files d'attente (Gelembé, 1982)	Approche cartésienne	Méthode pour la gestion des flux de matières, appliquée pour les systèmes de production.	- Difficilement adaptable à la gestion des flux d'informations et surtout aux mécanismes de décision coopératifs. - Absence de l'aspect temporel.
Réseaux de Pétri (Petri, 1962)	Approche cartésienne	Représentation des phénomènes et des mécanismes séquentiels, modélisation des systèmes à événements discrets	- Lisibilité graphique et précision dans la représentation des processus - Représentation de l'aspect dynamique d'un système
SADT (Ross, 1977)	Approche structurée	Modélisation par un ensemble de diagramme organisé hiérarchiquement	- Bonne lisibilité - Mise en œuvre facile - Représentation simple - Mal adaptée pour la représentation structurelle - Absence d'aspects dynamique
SA-RT (Ward et al., 1995)	Approche structurée	Complémentaire de SADT, elle prend en compte l'aspect dynamique du système à analyser (temporel). Elle est utilisée pour l'analyse et la conception de logiciels implantés sur des systèmes temps réel.	- Bonne lisibilité - Mise en œuvre facile - Représentation simple Mal adaptée pour la représentation structurelle
IDEF (IDEF0, 1993)	Approche cartésienne	Description hiérarchisée des systèmes complexes IDEF0 outil de modélisation fonctionnelle et organisationnelle IDEF3 extension de IDEF0 pour la représentation des processus	- Bonne lisibilité - Simple à mettre en œuvre - IDEF0 est mal adapté à la représentation structurelle - IDEF3 pallie la déficience d'IDEF0 dans la représentation des processus - IDEF3 prend en compte les aspects temporels mais ne permet pas de gérer les ressources et les flux de matières
MERISE (Dionisi, 1995)	Approche systémique	Modélisation méthodologique des données et des traitements. Elle est utilisée pour l'analyse et la conception de SI	- Bonne lisibilité - Possibilité de modélisation de tous les aspects - Délicate à modifier car elle touche tous les niveaux
CIMOSA (Vernadat, 1996)	Approche systémique	Modélisation complète et unifiée des différents flux	Représentation de différents flux de l'entreprise à travers une modélisation cohérente et complète, depuis l'expression des besoins jusqu'à la description de l'implantation. - Ne propose pas de représentation graphique

			ce qui rend difficile la représentation de systèmes complexes ou de taille importante - Lisibilité assez complexe
PERA (Williams, 1994)	Approche systémique	Conception de systèmes industriels de grandes tailles	Modélisation de l'aspect fonctionnel et informationnel d'un système
GERAM (GERAM, 1999)	Approche systémique	Généralisation de CIMOSA,PERA et d'autres architectures. Elle consolide l'ensemble des composants nécessaires à la construction d'une méthodologie de modélisation et d'ingénierie des systèmes	- Couvre l'ensemble d'une méthodologie d'ingénierie depuis la conception des modèles, leur implémentation jusqu'à leur management opérationnel. -Difficile à mettre en œuvre
Systèmes Multi-agents (SMA) (Ferber,1995)	Approche kénétique	Les SMA sont liés au domaine de l'intelligence artificielle distribuée. Ils peuvent être une réponse intéressante pour assurer une gestion interactive dans laquelle l'aspect humain et les systèmes automatiques peuvent coexister et décider ensemble.	- Possibilité d'autoadaptation aux environnements dynamiques et à la gestion de différentes sources d'informations distribuées. - la capacité de coordination entre les agents leur procure la capacité collective de gérer une grande masse d'informations.
UML (Booch et al., 1997)	Approche orientée objet	Langage de communication standard qui permet de visualiser, construire et documenter les différentes parties d'un système (notamment d'information)	-Compatible avec la notion processus -Représentation et compréhension faciles des flux physiques et d'informations - Permet une bonne modélisation de l'architecture de l'entreprise - Représentation graphique simple et claire.

Après analyse de ces différentes méthodes de modélisation, le langage UML nous a semblé être la solution la plus adéquate pour nos besoins de modélisation. En effet, UML, de part son orientation objet, offre des possibilités de réutilisation et de simplicité des modèles objet. De plus, grâce à sa notation graphique, UML représente un véritable support de communication. Il permet d'exprimer visuellement une solution objet, en limitant les ambiguïtés et les incompréhensions, facilitant la comparaison et l'évaluation de différentes solutions. D'autre part, c'est un langage universel qui est utilisable sur un grand nombre de supports (Bendriss, 2009).

Nous proposons d'utiliser le langage UML pour élaborer un modèle PLM centré sur le produit et mettant en évidence les interactions avec les différents partenaires de sa chaîne logistique tout au long de son cycle de vie. En effet, UML est largement utilisé pour modéliser les systèmes PLM.

UML pourrait être utilisé comme un langage commun offrant un point de vue partagé entre les différents utilisateurs de système PLM (Ristic et al., 2011). Dans (Eynard et al., 2004), les auteurs illustrent l'usage de UML dans les systèmes PLM. Ils insistent sur le fait qu' UML pourrait être utile dans la clarification du processus et les données qui seront utilisées dans le système, dans l'identification des interactions entre les utilisateurs et le système et dans la communication entre les différents utilisateurs. Nous présenterons dans le paragraphe qui suit, les modèles PLM proposés dans la littérature.

2. Modèles PLM : Etat de l'art

La plupart des modèles PLM proposés dans la littérature dépendent fortement du cas étudié et ne peuvent être utilisés dans d'autres entreprises, si de tels modèles ont été proposés, leur application a concerné une entreprise en particulier (Fathallah et al., 2008). De plus, peu de modèles PLM sont focalisés sur la représentation de toutes les étapes de cycle de vie du produit (Fathallah, 2011).

Certains auteurs ont utilisé des modèles basés sur un langage graphique semi-formel (Abramovici et Sieg, 2002 ; Grieves, 2006 ; Chiang et Trappey, 2007 ; Jun et al., 2007 ; Fathallah, 2011). Les composants du cycle de vie du produit sont traduits en pictogrammes et sont reliés entre eux au moyen de flux de matières et d'information représentés par des flèches simples.

Le modèle proposé par Chiang et Trappey (2007) concerne particulièrement l'industrie LCD (Liquid Crystal Display ou écran à cristaux liquides), ils ont développé une architecture conceptuelle du PLM pour la collaboration et l'intégration des membres de la chaîne de valeur du LCD.

Dans son modèle PLM présenté dans la figure II.6, Fathallah (2011) a explicité les sous-étapes de chacune des phases de cycle de vie avec un formalisme qui précise les départements ou opérateurs en charge de la sous-étape, les informations et les connaissances échangées avec les étapes précédentes et suivantes et les données conservées sur le produit. Le modèle inclut une base de stockage qui regroupe l'historique des informations relatives à l'évolution du produit tout au long de son cycle de vie, cette base pour la gestion des connaissances permet la création, la capitalisation et le partage de la connaissance.

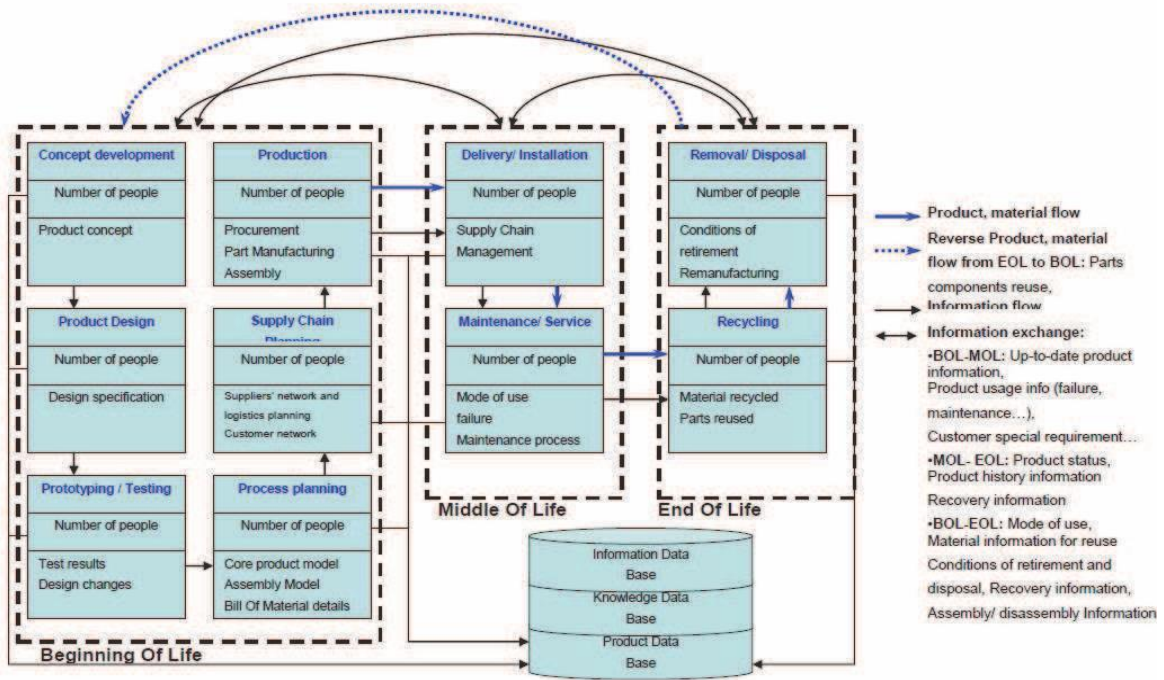


Figure II.6 : Modèle PLM proposé par (Fathallah, 2011)

Par ailleurs, d'autres auteurs ont utilisé le langage UML (Unified Modelling Language) pour modéliser leurs modèles PLM (Sudarsan et al., 2005 ; Terzi, 2005).

Terzi (2005) a proposé un modèle PLM (Figure II.7) pour assurer la traçabilité des produits tout au long du cycle de vie du produit, il est basé sur la notion de holon (le produit est une combinaison d'une partie physique et d'une partie informationnelle).

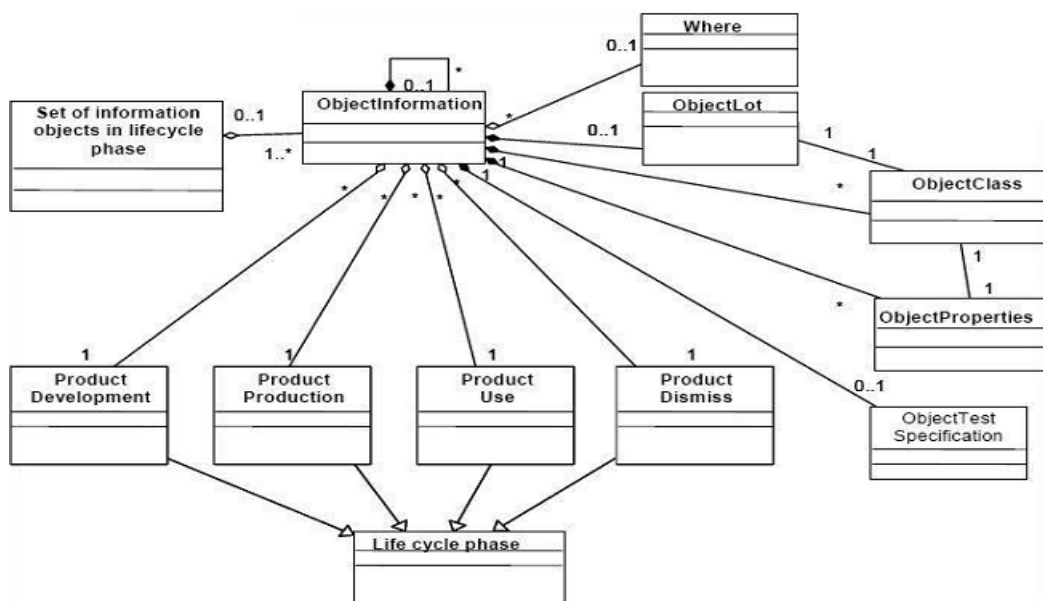


Figure II.7 : Modèle Holonique (Terzi, 2005)

Pour l'ensemble des modèles PLM étudiés, des composants communs sont relevés. A titre d'exemple, nous pouvons citer le cycle de vie du produit, les bases de données qui regroupent les informations sur le produit et les informations échangées sur le cycle de vie du produit et la représentation des flux échangés (flux de matières et flux d'informations).

Deux concepts de base sont essentiels à l'application du PLM en entreprise, l'interopérabilité entre les différents départements qui appliquent cette vision et la traçabilité des données produit tout au long de son cycle de vie. Il est important qu'un modèle PLM illustre ces deux concepts pour contribuer au succès de la vision PLM (Fathallah et al., 2008).

Les divergences entre les modèles sont essentiellement dans la représentation graphique des primitives de la modélisation. Différentes chartes graphiques sont utilisées. De plus, derrière chaque modèle, il y a un objectif bien spécifique.

Nous proposerons dans la section qui suit un modèle PLM adapté à notre problématique.

3.1. Modèle PLM proposé

Contrairement aux modèles PLM proposés dans la littérature qui intègre uniquement le cycle de vie, notre modèle PLM intègre également les différents partenaires de la chaîne logistique. Notre modèle PLM permettra de montrer les différentes relations entre le produit, les maillons de la chaîne logistique et les différentes phases de cycle de vie du produit.

Cette modélisation donnera ainsi une meilleure visibilité de l'évolution du produit dans sa chaîne logistique durant son cycle de vie.

Nous utilisons, à ce niveau, principalement le diagramme de classes du langage UML. Nous expliciterons, dans ce qui suit, les différentes classes qui constituent notre modèle.

3.1. Classe « Produit »

La norme (NF X 50-150, 1990) définit un produit comme étant ce qui est ou sera fourni à l'utilisateur pour répondre à son besoin.

Le terme « produit » est générique. En effet, l'objet correspondant change d'état d'une phase à une autre. Il s'avère alors nécessaire de lui affecter des noms précis selon les processus par

lesquels il passe tout au long de sa chaîne logistique durant son cycle de vie. On parle plutôt d'une « idée » dans la phase d'expression de besoin, d'une « maquette numérique » en conception et simulation assistées par ordinateur puis de « prototype » pour les tests et les essais.

Par la suite, le produit est fabriqué, stocké, transporté puis utilisé par le client final. Nous regroupons tous ces états dans la classe « produit physique ».

Le produit subit une « activité » qui a pour but de le transformer. Un produit peut être composé d'un ou de plusieurs composants ce qui est schématisé dans le diagramme par une relation de composition réflexive de la classe « Produit ».

La classe « statut » précise l'état d'avancement du produit ou de l'activité qu'il subit (Figure II.8).

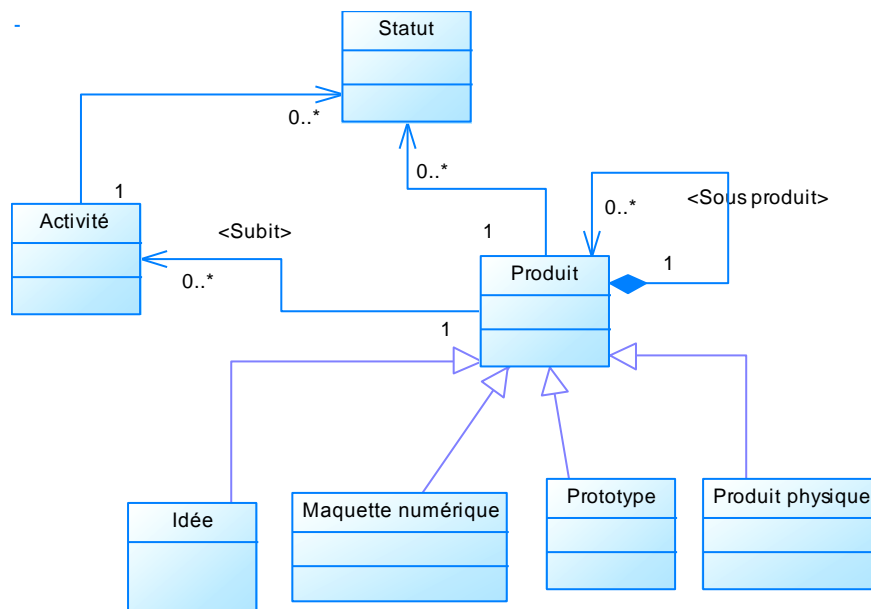


Figure II.8 : Spécifications de la classe «Produit»

3.2. Classe « Phase »

La classe « phase » exprime les différents stades de cycle de vie du produit (figure II.9). Nous adopterons pour notre modèle PLM, un cycle de vie composé de trois principales étapes :

Une première étape « Début de vie » qui comporte les phases de :

- Définition du besoin (exigences du client, étude de faisabilité) ;
- Développement du produit qui comprend essentiellement la phase conception puis le prototypage et les tests.

Une deuxième étape « Milieu de vie » où l'on distingue les phases de :

- Production qui comprend toutes les étapes de fabrication (assemblage ou transformation) ;
- Distribution qui comprend le stockage, le transport et la livraison ;
- Utilisation du produit par le client.

Et une troisième étape « Fin de vie » qui comporte les phases de démantèlement, de rejet ou de recyclage du produit.

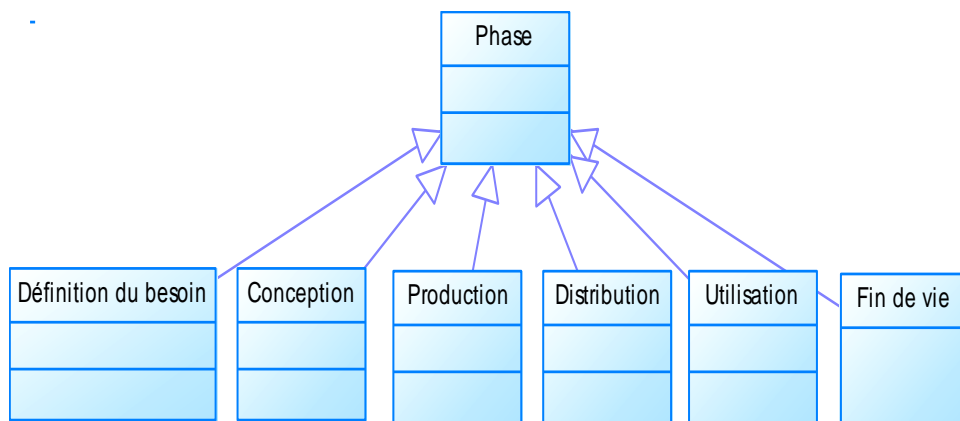


Figure II.9 : Spécifications de la classe «Phase»

3.3. Classe «Acteur logistique»

Un acteur de la chaîne logistique est une entité qui prend part au cycle de vie d'un produit physique (Maxwell et Van der Vorst, 2003).

Le cycle de vie n'évolue pas sans interaction avec les acteurs de la chaîne logistique. En effet, ce sont les maillons de la chaîne qui exécutent les différentes activités du cycle de vie.

Nous considérons une chaîne logistique se composant des maillons suivants : fournisseur, entreprise de production, entrepôt, transport et client final (Figure II.10) :

- Fournisseur : c'est une entité qui fournit à l'entreprise la matière première ou tout composant entrant dans la fabrication du produit.
- Entreprise de production : c'est une structure ayant des ressources et moyens afin de produire des biens et services. Elle doit collaborer et coordonner avec tous les maillons

de la chaîne logistique afin d'offrir un produit qui réponde aux attentes du marché.

- Entrepôt : c'est un lieu de stockage de biens en vue de leur expédition vers un client (interne ou externe à l'entreprise). Il peut être détenu et géré en propre par l'entreprise ou faire l'objet d'une sous-traitance auprès d'un prestataire logistique.
- Transport : c'est une entité responsable du transport du produit entre les différents maillons, de l'approvisionnement à la production, l'acheminement aux entrepôts et la distribution aux clients.
- Client : c'est l'entité à qui le produit est destiné.

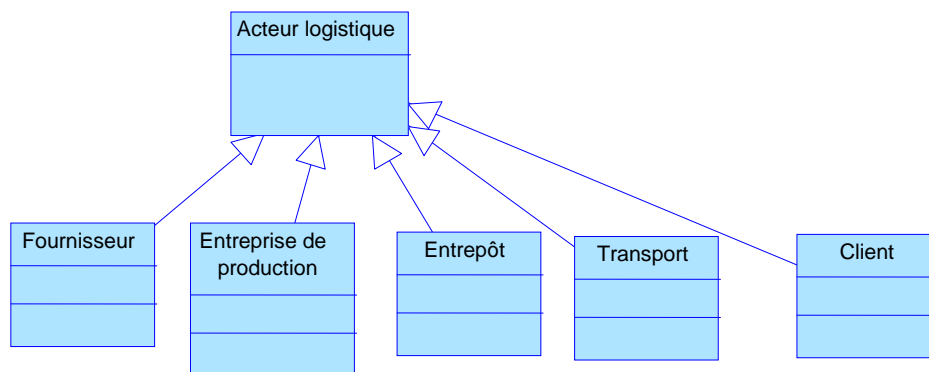


Figure II.10 : Spécifications de la classe « Acteur logistique »

3.4. Classe « Ressource »

Il s'agit des ressources propres à un maillon de la chaîne logistique et qui sont nécessaires pour la réalisation d'une activité. On distingue trois types de ressources (Figure II.11) :

- Ressources humaines
- Ressources matérielles
- Ressources logicielles

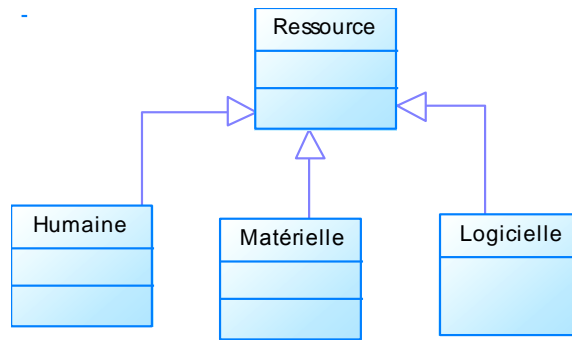


Figure II.11 : Spécifications de la classe « Ressource »

3.5. Classe « Contrainte »

Une contrainte est une limitation à la liberté de choix du concepteur/réalisateur d'un produit (NF X 50-150, 1990). Une contrainte peut être relative au coût, au délai ou à la qualité du produit. Elle peut être liée soit à une activité, soit à un maillon de la chaîne logistique (Figure II.12).

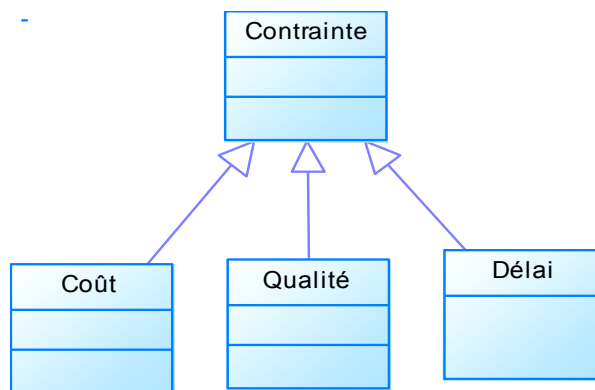


Figure II.12 : Spécifications de la classe « Contrainte »

3.6. Classe « Activité »

Une activité peut être définie comme tout type d'action effectuée par une ou plusieurs ressources ayant différents rôles et ce, pour satisfaire un objectif donné (Gzara, 2000).

Nous considérons que chaque phase de cycle de vie est constituée de plusieurs activités. Par exemple, la phase de production est constituée d'activités telles que l'assemblage, la transformation, le contrôle qualité, le conditionnement.....

Une activité est donc liée à une phase de cycle de vie, elle est exécutée par un acteur de la chaîne logistique et nécessite l'utilisation de ressources (Figure II.13).

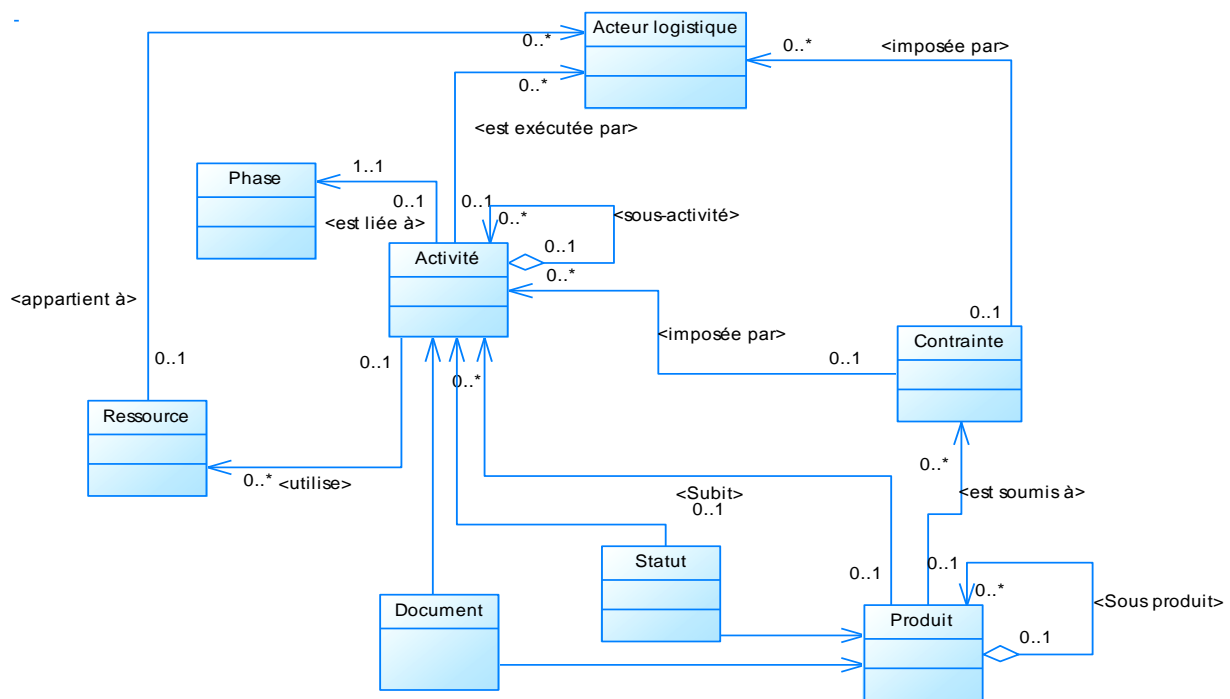


Figure II.13 : Spécification de la classe « Activité »

3.7. Classe « Document »

C'est un support d'enregistrements des données relatives au produit (commande client, ordre de fabrication, gamme de fabrication, demande de modification, dessin de définition, dessin CAO).

En effet, le PLM se base sur le principe de la capitalisation de l'expérience à travers l'organisation et l'archivage des données (Debeacker, 2004). 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.

3.8. Modèle PLM global

Le modèle PLM est centré sur le produit. Ce « produit » subit des « activités » qui sont liées à une « phase » de cycle de vie et sont exécutées par un « acteur logistique ».

Le « produit » est soumis à des « contraintes » qui sont imposées soit par « l'activité », soit par « l'acteur logistique » (Figure II.14).

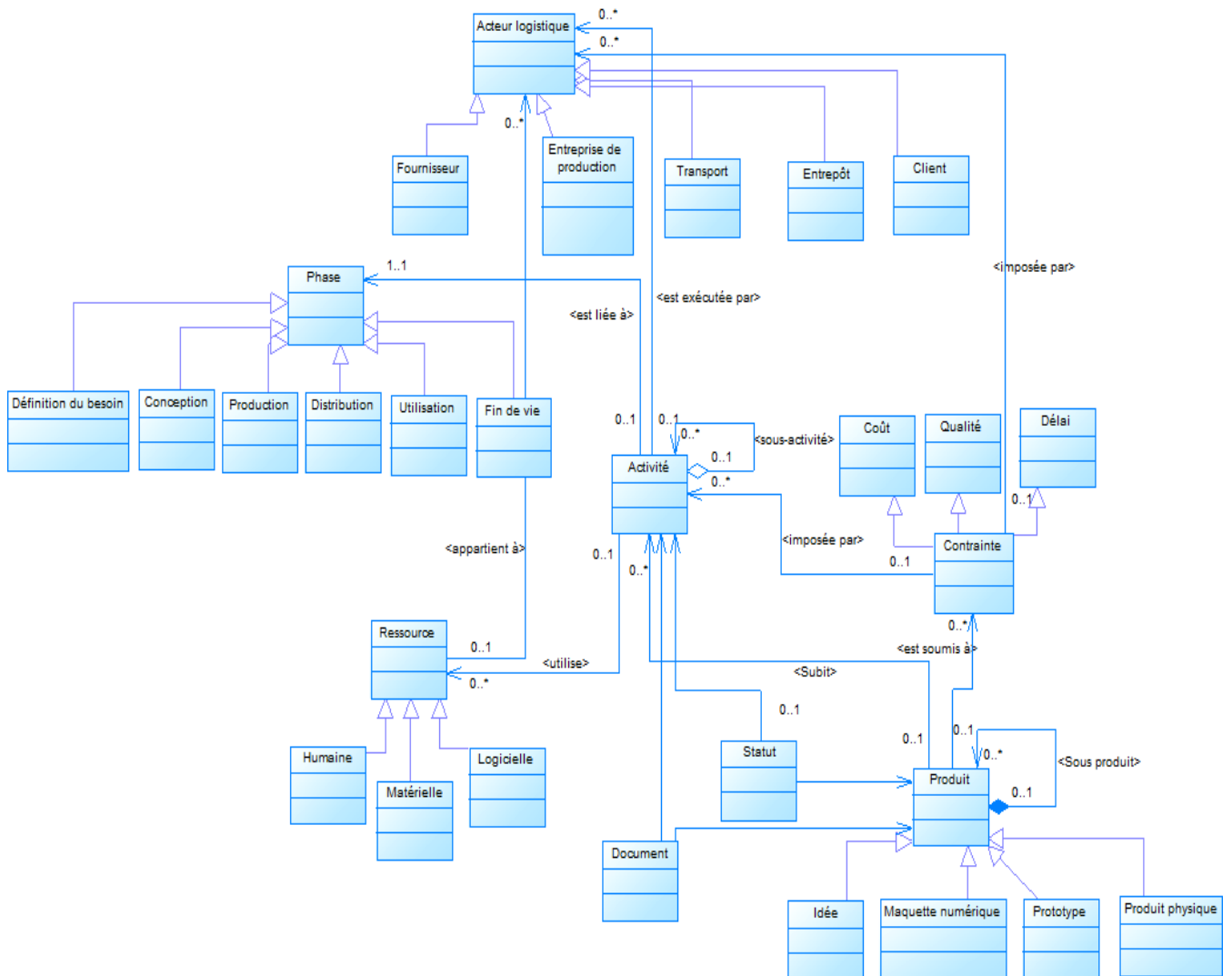


Figure II.14 : Modèle PLM proposé intégrant cycle de vie et chaîne logistique (Bouhaddon et al., 2012)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de modélisation en entreprise ainsi que les modèles PLM proposés dans la littérature.

Nous avons adopté le langage UML pour modéliser notre modèle PLM intégrant cycle de vie et chaîne logistique.

Le modèle ainsi établi, formalise notre approche PLM centrée sur le produit. Il met en évidence les différentes interactions entre le produit et sa chaîne logistique tout au long de son cycle de vie. Ce modèle servira de canevas pour intégrer toutes les contraintes des acteurs de la chaîne logistique et qui sont responsables des différentes phases du cycle de vie du produit. Il est destiné à représenter toutes les informations liées à un produit conçu ou à concevoir. Ce modèle sera exploité dans l'application industrielle.

Nous mettons l'accent dans la suite de nos travaux, sur la phase de conception du produit. Comme nous l'avons signalé dans le chapitre précédent, la conception est considérée comme une phase stratégique du cycle de vie du produit. En effet, c'est dans cette phase qu'est déterminée et décidée la grande majorité des caractéristiques et des comportements du futur produit, ainsi que son processus de fabrication et même toute sa chaîne logistique.

Par conséquent, 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.

Nous proposons dans le chapitre suivant une méthodologie basée sur l'approche PLM pour la conception du produit et sa chaîne logistique optimisée.

Chapitre 3 :
Méthodologie basée sur l'approche
PLM pour la conception du produit et
de sa chaîne logistique

Introduction

La conception est une activité complexe. Cette complexité est due pour une grande part à la position qu'occupe la conception au sein des entreprises et aux nombreux acteurs et organisations qui y interviennent (Zouari, 2007). Elle doit aujourd'hui répondre à différents objectifs, porteurs de multiples contraintes.

L'intégration des acteurs de la chaîne logistique responsables des principales étapes du cycle de vie du produit dans la phase de conception permet de concevoir un produit adapté à sa chaîne logistique. Aussi, cette intégration des métiers « aval » au plus tôt permet-elle de déceler 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 satisfaire le besoin du client et à diminuer ses coûts, voire les coûts de toute la chaîne logistique associée.

Ce chapitre vise à élaborer une méthodologie basée sur la vision PLM pour la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique. Nous présentons, en premier lieu, un état de l'art sur la problématique de conception du produit et de sa chaîne logistique.

Nous proposons ensuite notre démarche combinant PLM et modèles mathématiques pour optimiser les décisions de conception du produit et de sa chaîne logistique simultanément.

Enfin, cette démarche sera modélisée par le langage UML.

1. Etat de l'art sur la conception du produit et de sa chaîne logistique

D'après (Baud-Lavigne, 2012), les approches pertinentes pour traiter le problème de la conception conjointe du produit et de sa chaîne logistique sont :

- l'intégration des contraintes logistiques dans la conception des produits ;
- la prise en compte des spécificités des produits dans la conception de la chaîne logistique ;
- les approches intégrées.

1.1. Intégration des contraintes logistiques dans la conception du produit

L'intégration consiste en la prise en considération, notamment lors des étapes amont des projets de conception, des besoins, des exigences, des contraintes et d'autres spécificités des fonctions métiers responsables des étapes aval du cycle de vie du produit (par exemple, la production, l'usage et la mise hors service) (Koike, 2005).

Il existe dans la littérature des travaux qui traitent de l'intégration des contraintes logistiques dans les phases amont du cycle de vie du produit, ils sont répertoriés dans (Koike, 2005). Nous mettons en avant les approches du type Conception pour X (*Design For X – DFX*). Résultant d'une prise de conscience de l'importance de l'impact des décisions prises en amont, au sein du processus de conception sur les métiers situés en aval, le concept de DFX est apparu à la fin des années 50 (Matousek, 1957 ; Niebel et Baldwin, 1957 ; Everhart, 1960). En effet, le DFX est un ensemble de méthodologies qui ont pour objectif d'améliorer la conception par la sensibilisation des concepteurs au regard d'objectifs et préoccupations variés (Huang, 1996 ; Kuo et al., 2001).

Leur principe est basé sur le fait de concevoir le produit en vue d'optimiser sa propriété X, celle-ci pouvant désigner un attribut du produit (coût, impact sur l'environnement...) ou une phase de son cycle de vie (fabrication, maintenance...). Ces méthodes consistent à n'étudier que l'influence de X sur les autres propriétés, contrairement à l'ingénierie simultanée où toutes les phases du cycle de vie sont prises en compte avec le même degré d'importance (Sallaou, 2008).

En ce qui concerne la logistique, le DFX se décline en deux groupes d'outils : le DFL (*Design For Logistics*) et le DFSCM (*Design For Supply Chain Management*). La conception pour la logistique (DFL) et la conception pour la gestion de la chaîne logistique (DFSCM) sont un ensemble de méthodes et de règles pour prendre en compte les contraintes logistiques dans la conception des produits (Dowlatshahi, 1999).

Lee et Billington (1992) présentent le concept de DFSCM comme étant une approche importante pour prendre en compte les coûts associés au passage du produit (les composants et le produit fini) tout au long de sa chaîne logistique jusqu'au client final.

L'approche DFL peut être considérée comme une partie du DFSCM (Gokhan, 2007).

Les travaux sur le DFL dans (Lee, 1996) ont pour objectif de concevoir des produits afin qu'ils puissent être transportés facilement et de manière rentable.

Dowlatshahi (1996) a proposé une approche de DFL (Figure III.1). Il s'agit d'un modèle conceptuel sensé faciliter l'interface et la collaboration de l'ingénierie et de la logistique, dans un environnement d'ingénierie concurrente. Dans ce modèle, le DFL est considéré comme un outil d'interface entre ces métiers et décomposé en quatre sous-systèmes selon le "domaine d'interface" (area of interface) : ingénierie logistique (Logistics Engineering), logistique de soutien (Manufacturing Logistics), conception pour l'emballage (Design For Packaging) et conception pour le transport (Design For Transportability).

Chaque sous-système est divisé en modules qui sont constitués de variables ou paramètres qui doivent être pris en compte dans les choix de conception (design factors).

Selon l'auteur, ces facteurs (par exemple : diversité produit, performance produit, poids, spécifications techniques, caractéristiques du marché, type de moyen de manutention, etc.) sont des paramètres qui caractérisent chacun des domaines d'interface.

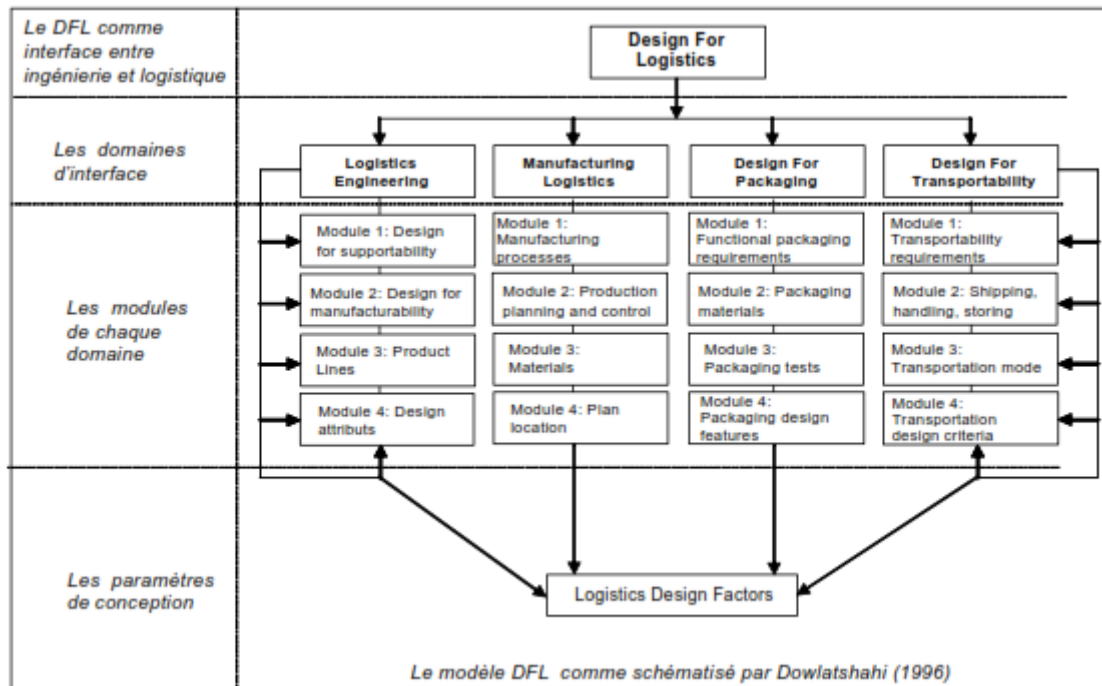


Figure III.1 : Le modèle DFL de Dowlatshahi (1996)

Les travaux sur le DFL et le DFSCM (Mather, 1992 ; Newlands et Steeple, 2000 ; Silva et Van Houten, 2003) ont mis en avant les bénéfices de concepts qualitatifs tels que la conception modulaire, la différenciation retardée et des règles comme la réduction du nombre de composants ou de références utilisés et la standardisation des composants permettant une baisse des coûts liés à la gestion de la diversité, au stockage et au transport des produits. D'autres auteurs préconisent aussi dans le cadre du DFSCM, l'intégration des fournisseurs dès les phases amont des projets de conception (Nishigushi, 1994 ; Handfield et Nichols, 1999).

Néanmoins, ces travaux concernant l'intégration des contraintes logistiques supposent que la chaîne logistique existe déjà et les approches proposées sont plutôt unidimensionnelles en ce qui concerne la vision de l'intégration.

1.2. Conception de la chaîne logistique en considérant les contraintes du produit

Depuis une quinzaine d'années, la littérature sur la conception des chaînes logistiques s'est intéressée à intégrer des contraintes venant des produits par des modélisations prenant en compte les nomenclatures, par l'étude des particularités des produits et leurs effets sur la chaîne logistique (Baud-Lavigne, 2012). Cette revue de littérature s'intéresse aux études portant sur les liens entre la conception produit et la conception de la chaîne logistique dans les modèles mathématiques déterministes.

L'intégration explicite des nomenclatures « produits » dans la conception de la chaîne logistique a été traitée par Arntzen et al. (1995), qui présente un modèle multi-périodes et multi-produits en programmation linéaire mixte. Ce modèle prend en compte les coûts fixes et variables de production, de stockage, de distribution par plusieurs modes possibles et enfin les taxes. Le critère d'optimisation est la minimisation, à la fois des coûts et des délais de réponses, les deux composantes étant agrégées avec une pondération.

Rota-Franz (1998) propose un modèle basé sur la connaissance des différentes localisations possibles des sites, sur les liens possibles entre les installations (caractérisés en quantité maximale, coût unitaire et durée du transport), sur les nomenclatures des articles finis et sur les demandes prévisionnelles des clients, afin de déterminer la localisation et l'allocation de chaque site.

Cordeau et al. (2006) et Paquet (2007) proposent des modélisations en programmation linéaire mixte pour concevoir une chaîne logistique multi-échelons et multi-produits en considérant les contraintes d'assemblages et des nomenclatures détaillées.

Dans ces différents travaux, les nomenclatures des produits finis sont connues, donc la conception des produits est, a priori, terminée.

1.3. Conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique

Les travaux considérant la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique sont très récents. Pour Hadj Hamou (2002), les processus de conception produit et chaîne logistique partagent quatre objectifs : réduire les délais, maîtriser la diversité, améliorer la qualité et diminuer les coûts.

Dans leur approche, Lamothe et al. (2006) utilisent une représentation générique de la nomenclature afin d'identifier simultanément la meilleure instance de la nomenclature de produit et la structure optimale de sa chaîne logistique. Le mot générique est utilisé pour représenter un ensemble de produits, une famille de produits. Ce problème est résolu en programme linéaire en nombre entiers minimisant le coût total de la chaîne logistique sous diverses contraintes.

Dans l'approche proposée par Agard et Penz (2009), il ne s'agit pas de choisir la meilleure instance de la nomenclature générique, mais de construire une nomenclature générique. Il s'agit d'un modèle pour la conception d'une nomenclature de produit couplée à son process et à sa chaîne logistique. Le problème minimise le coût de production et de transport. La politique de production consiste à fabriquer des composants pré-assemblés appelés modules qui seront fabriqués dans des sites délocalisés et expédiés dans une usine de proximité pour l'assemblage final.

El Maraghy et Mahmoudi (2009) définissent pour chaque produit plusieurs nomenclatures alternatives, une seule étant retenue dans la solution optimale. Le modèle proposé optimise simultanément le choix des nomenclatures et la chaîne logistique globale sur plusieurs périodes.

Les travaux de Baud-Lavigne et al. (2012) portent sur l'optimisation de la chaîne logistique simultanément avec la standardisation des produits. Ils illustrent l'impact de la standardisation des

produits sur la structure de la chaîne logistique. Ils ont utilisé un modèle mathématique en programmation linéaire mixte. Cependant, la résolution du problème est très complexe, vu le nombre importants de variables et de contraintes.

Dans ces travaux de conception simultanée de produit et sa chaîne logistique, les auteurs se sont focalisés sur la conception modulaire et la standardisation des composants.

Les modèles d'optimisation produits - chaîne logistique sont encore peu étudiés. De part la complexité des modèles induits, très peu de modèles traitent des problèmes intégrés. Ceux-ci utilisent un très grand nombre de variables pour modéliser le problème d'une façon complète et sont par conséquent difficiles à résoudre.

Dans le cadre de notre thèse, le problème de conception produit-chaîne logistique sera traité en combinant les trois approches précédemment présentées, à savoir : l'intégration des contraintes logistiques en phase de conception, la prise en compte des contraintes du produit pour la conception de la chaîne logistique et la conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique.

Nous considérons que nous sommes dans le cas de la conception d'un nouveau produit, il y a certes des maillons de la chaîne logistique qui existent déjà (par exemple, un entrepôt qui existe déjà). Pour ceux là, nous devons intégrer leurs contraintes en phase de conception. Pour d'autres maillons qui seront nécessaires pour la chaîne logistique mais qui ne sont pas encore déterminés, ils seront conçus en tenant compte des spécificités du produit (la sélection de nouveaux fournisseurs par exemple).

1.4. Bilan et positionnement

Nous rappelons que les auteurs qui ont traité la problématique de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique se sont focalisés sur la conception modulaire et la standardisation des composants et n'ont intégré que quelques maillons de la chaîne logistique.

Nous traiterons dans cette thèse, le cas d'une conception de produit beaucoup plus générique (c'est-à-dire pas forcément modulaire, ni nécessairement avec des composants standardisés) et en intégrant tous les maillons de la chaîne logistique.

Cependant, les problèmes intégrés génèrent des modèles mathématiques complexes. Ceux-ci utilisent un très grand nombre de variables pour modéliser le problème d'une façon complète et sont par conséquent difficiles à résoudre.

Nous proposons une approche hybride combinant PLM et modèles mathématiques pour optimiser les décisions de conception du produit et de sa chaîne logistique simultanément, (Figure III.2).

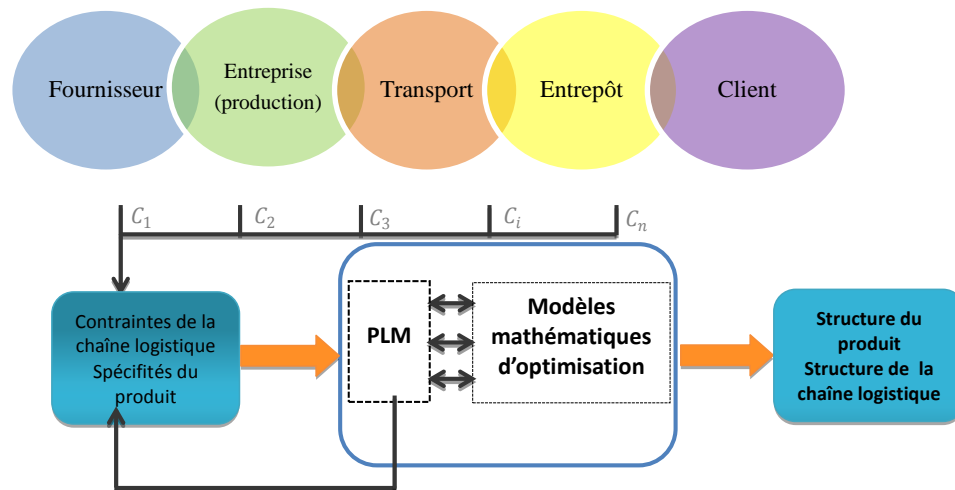


Figure III.2 : Approche proposée intégrant PLM et modèles mathématiques

Nous exploiterons l'approche PLM par :

- L'intégration des contraintes de la chaîne logistique dans **la phase de conception**, ces contraintes C_i sont des flux d'informations relatives à l'entreprise de production, aux clients, aux fournisseurs, aux entrepôts et aux prestataires de transport qui peuvent être modifiées à chaque instant.
- **La collaboration** de tous les acteurs de l'entreprise étendue (les différents maillons de la chaîne logistique).
- La conception **simultanée du produit et sa chaîne logistique**
- **La capitalisation et archivage** de toutes les données.

- La possibilité de faire des **modifications** à chaque fois qu'il y a de nouveaux aléas au niveau de chaque maillon de la chaîne logistique vu qu'une stratégie de chaîne logistique basée sur la flexibilité et la rapidité est la meilleure approche pour gérer la pression croissante que subissent les chaînes logistiques actuelles.

1.5. Approche adoptée

Contrairement aux approches classiques centralisées utilisées pour traiter le problème intégré de conception du produit et de sa chaîne logistique, nous adoptons une démarche couplant des décisions centralisées quand il s'agit d'intégrer les contraintes des différents maillons de la chaîne logistique et une approche décentralisée quand il s'agit d'optimiser localement par programmation mathématique chaque maillon de la chaîne.

Le mode décentralisé réduit la complexité de résolution des modèles mathématiques et permet à la chaîne logistique de répondre rapidement à l'évolution des conditions locales de chaque maillon. Le regroupement centralisé des informations par le PLM permet de prendre en considération la dépendance entre les maillons améliorant ainsi les résultats obtenus par optimisation locale.

Le PLM jouera le rôle d'intégrateur. D'une part, les partenaires de la chaîne logistique sont liés par le PLM : en effet, les contraintes des différents maillons sont intégrées au niveau de la maquette numérique. D'autre part, à travers cette maquette numérique, le PLM structure la configuration de la chaîne logistique (figure III.3).

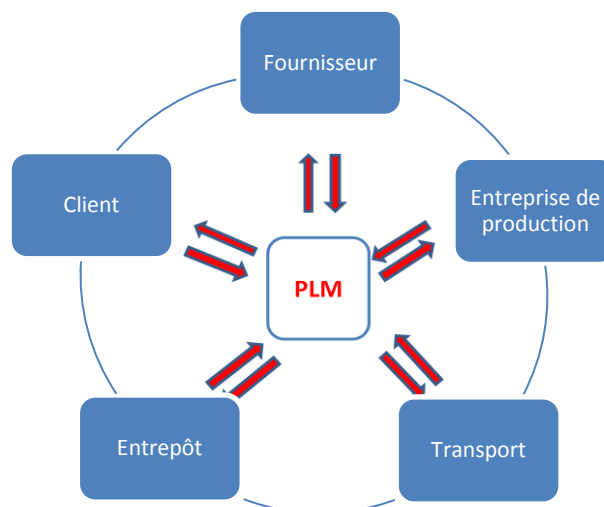


Figure III.3 : Maillons de la chaîne logistique liés par le PLM

2. Méthodologie de conception du produit et de sa chaîne logistique

Nous supposons que nous sommes dans le cas d'une conception d'un nouveau produit par une entreprise manufacturière. Une entreprise manufacturière a pour objectif de transformer des matières premières ou des composants reçus de ses fournisseurs et d'assembler les composants obtenus pour en faire les produits à livrer à ses clients.

Nous considérons une chaîne logistique se composant de maillons suivants : fournisseurs, entreprise (de production), entrepôts, moyens de transport et clients. Ces maillons représentent les principales fonctions de la chaîne logistique (approvisionnement, production, stockage et transport).

Dans un contexte PLM, lors de la conception d'un nouveau produit, concepteurs, fabricants et tous les autres membres de l'entreprise étendue doivent définir simultanément la structure du produit et de sa chaîne logistique. Nous présentons dans l'organigramme (figure III.4) notre démarche de conception du produit et de sa chaîne logistique basée sur l'approche PLM.

Toutes les opérations sont faites au niveau de la maquette numérique. C'est autour de cette maquette que se regroupent tous les acteurs influençant la conception du produit. Cet outil de partage d'informations entre le concepteur et les différents maillons de la chaîne logistique constitue le cœur du PLM.

En premier lieu, le concepteur reçoit un ensemble de contraintes de la part de chaque maillon de la chaîne logistique notamment du client (spécificités du cahier de charges). Le concepteur doit aussi penser à intégrer les contraintes des maillons non existants qui peuvent être anticipées.

Ces contraintes sont ensuite hiérarchisées selon leur importance. La hiérarchisation des contraintes peut varier avec le temps vue l'évolution des marchés et l'instabilité de l'environnement.

Les itérations de la conception peuvent être nombreuses, il est donc nécessaire de tracer, d'archiver les choix de conception et leurs justifications. La capitalisation des informations étant une fonctionnalité du PLM.

Notre démarche prend en considération deux cas :

- Cas d'existence de quelques maillons de la chaîne logistique donc leurs contraintes seront prises en compte dans la conception du produit : La tâche du concepteur sera d'adapter le produit aux moyens existants (en termes de transport, processus de fabrication, entrepôt, système de manutention...). Ces maillons seront appelés « maillons existants (ME) ».
- Cas de non existence de certains maillons : Nous sommes donc amenés à créer de nouveaux maillons, leurs contraintes devraient être anticipées en phase de conception (Par exemple, il sera judicieux de penser à la conception qui permettra d'optimiser le transport du produit même si le maillon « transport » n'existe pas encore). On appellera ces maillons de la chaîne logistique « nouveaux maillons (NM) ».

3. Description de la démarche proposée

La figure III.4 décrit la démarche proposée, nous expliciterons les différentes étapes dans les paragraphes qui suivent.

Chapitre 3 : Méthodologie basée sur l'approche PLM pour la conception du produit et de sa chaîne logistique

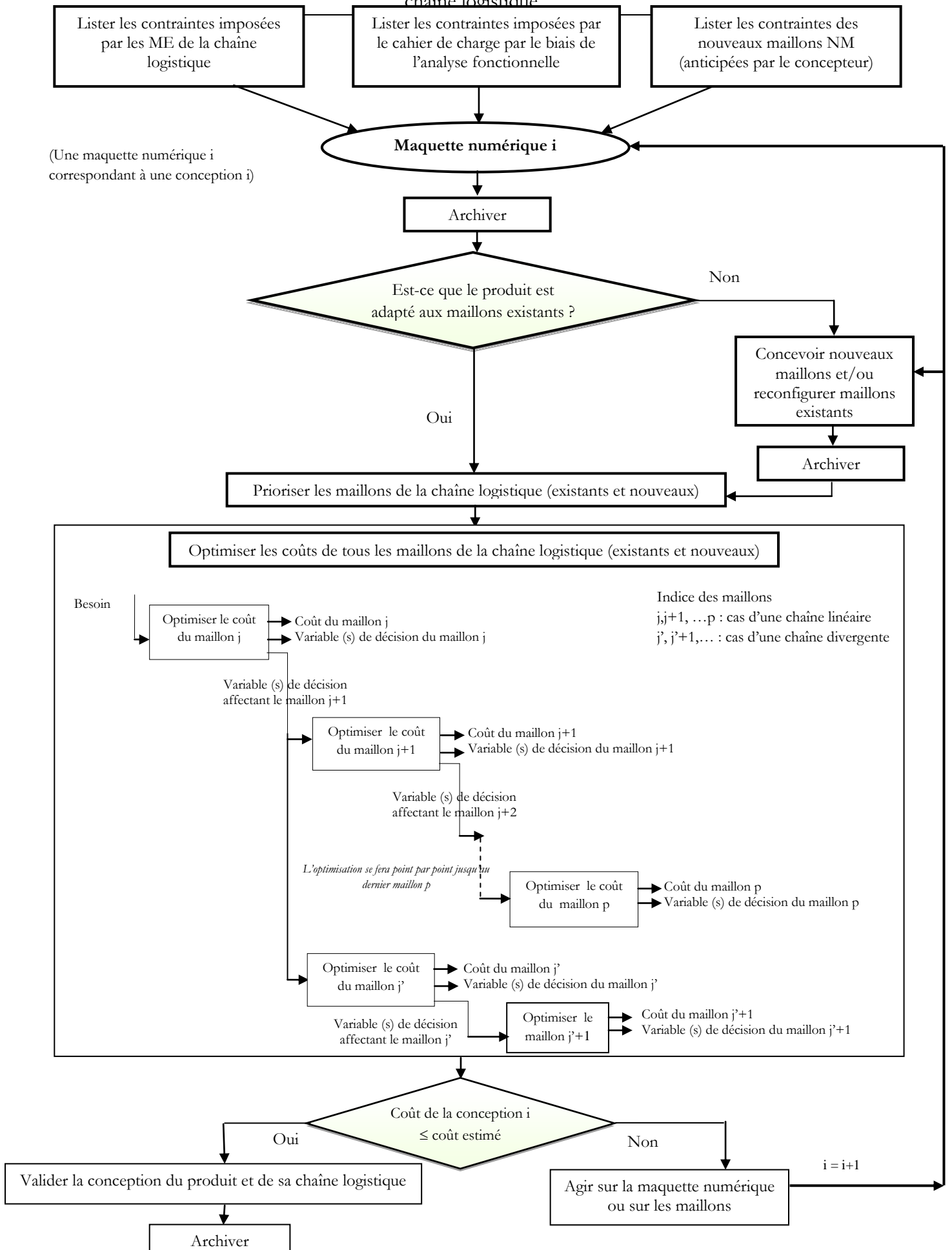


Figure III.4 : Démarche proposée de conception du produit et de sa chaîne logistique (Bonhaddou et al., 2013)

3.1. Détermination des contraintes de la chaîne logistique

Dans un premier lieu, on recense toutes les contraintes imposées par le cahier de charges et les maillons existants de la chaîne logistique. Ces contraintes imposent plusieurs spécifications techniques qui doivent être satisfaites lors de la conception du produit.

Dans un deuxième temps, il faudrait anticiper les contraintes des nouveaux maillons pour les intégrer dans la conception. L'objectif de cette étape étant de prendre en considération en amont du cycle de vie du produit toutes les contraintes logistiques.

Nous distinguons deux types de contraintes :

- des contraintes économiques visant à minimiser le coût de la chaîne logistique (coût d'approvisionnement, coût de production, délai d'approvisionnement, ...) ;
- des contraintes techniques liées à la structure de chaque maillon de la chaîne logistique (capacité de production, capacité de transport, conditions de stockage,...).

Il est évident que les contraintes de la chaîne logistique à intégrer dans la conception du produit dépendent du type de celui-ci. Toutefois, nous citerons dans le tableau III.1, à titre indicatif, quelques critères relatifs à chaque maillon, à prendre en considération dans la conception.

Tableau III.1 : *Quelques contraintes à prendre en considération dans la conception*

Maillon de la chaîne logistique	Exemples de critères
Fournisseur	Prix de vente, Délai d'approvisionnement, Qualité, Capacité de production, Capacité technique, Localisation géographique...
Entreprise (de production)	Coût de production, Capacité technique, Moyens de production ...
Entrepôt	Coût de stockage, Coût de manutention, Capacité de l'entrepôt Conditions de l'entrepôt (température, humidité,...), Moyens de manutention, Géométrie des étagères de stockage et/ou palettes (dimensions, formes...), Localisation géographique ...
Prestataire de transport	Coût de transport, Délai de transport, Capacité de transport, Mode de transport, Conditions de transport...
Client	Cahier de charges du client (spécificités techniques, prix, quantités demandées, ...), Délai de livraison, Localisation géographique ...

Les contraintes des différents maillons de la chaîne logistique n'ont pas le même ordre d'importance, il est alors nécessaire de les hiérarchiser avant de les intégrer dans la conception.

3.2. Réalisation de la maquette numérique et archivage des données

Nous rappelons que la maquette numérique représente le produit dans sa phase de conception. Cette étape consiste à réaliser une conception préliminaire du produit à partir des contraintes de la chaîne logistique auparavant hiérarchisées. Plusieurs informations relatives au produit peuvent être dégagées à ce stade : nomenclature, spécifications géométriques, propriétés physiques, gamme de fabrication,...

La conception préliminaire du produit est susceptible de subir des changements et modifications jusqu'à l'obtention d'une conception optimale du produit.

Comme l'archivage des données est une fonctionnalité clé du PLM, nous avons tenu à archiver toutes les données issues de chaque étape de la démarche. Cela constituera un historique et permettra ainsi d'éviter toute redondance.

3.3. Vérification si le produit est adapté aux maillons existants

Avec une conception préliminaire du produit, on vérifie si celle-ci est adaptée aux maillons existants de la chaîne logistique ou qu'il est nécessaire de prévoir une reconception de la chaîne logistique. Cela suppose la conception de nouveaux maillons et éventuellement la reconfiguration de certains maillons existants. Nous explicitons ces deux cas :

3.3.1. Cas 1 : Nécessité de reconfigurer certains maillons existants.

Dans le cas où la conception ne satisfait pas les contraintes des maillons existants, il faut :

- Ressortir les maillons auxquels le produit n'est pas adapté
Exemple : L'entreprise comme maillon incapable de satisfaire les exigences du produit, à cause d'un manque d'équipement ou de machine (Ressources matérielles).

- Reconfigurer ces maillons : il s'agit d'apporter des modifications sur le maillon en question en vue de remédier au problème posé.

Exemple : Achat de nouvelles machines, augmentation de la capacité de l'entrepôt...

- Archiver ces modifications : il est nécessaire d'archiver ces modifications car elles entraînent de nouvelles contraintes à considérer.

3.3.2. Cas 2 : Nécessité de concevoir de nouveaux maillons

La conception des nouveaux maillons prend en considération :

- Les contraintes de la maquette numérique : l'objectif est d'intégrer les contraintes du produit lors du choix des nouveaux maillons ;
- Les contraintes des maillons existants : ceci permettra d'exploiter au mieux ce qui existe déjà dans la chaîne logistique ;
- Les critères de choix usuels spécifiques à chaque type de maillon (performance, localisation, disponibilité,...).

Exemple : Il existe des critères de sélection du maillon « fournisseur » tel que le prix, la qualité, la livraison, la localisation géographique, la situation financière...

Les principaux critères de sélection des fournisseurs avec un degré d'importance relatif à chaque critère ont été présentés dans les travaux de Dickson (1966) et Weber et al. (1991).

Exemple : Concernant le choix du maillon « transport », nous pouvons considérer des critères tel que le coût, la sécurité, la rapidité, la protection de l'environnement. Le choix d'une solution de transport réside dans le choix du mode du transport (aérien, maritime, fluvial, routier, ferroviaire), du moyen de transport utilisé (semi-remorques, camions,...), du type de gestion (compte propre ou compte d'autrui), du type de livraison (directe ou intermodale), du type du service offert au client en terme de chargement (chargement partiel ou complet), etc. (Blauwens et al., 2006).

Nous rappelons que la conception des nouveaux maillons à ce niveau concerne essentiellement les décisions stratégiques (choix du fournisseur, choix des modalités de transport, localisation des

entrepôts,...). L'optimisation des flux entre les différents maillons de la chaîne logistique se fera dans l'étape qui suit.

3.4. Optimisation des maillons de la chaîne logistique

Une fois, on a la structure des différents maillons (existants et nouveaux) de la chaîne logistique, on priorise ces maillons pour avoir le sens selon lequel se fera l'optimisation.

L'optimisation mathématique se fera point par point où l'optimisation d'un maillon influence sur celui qui le succède. En effet, les solutions (variables de décision) du modèle mathématique d'un maillon deviennent des paramètres ou des contraintes du modèle mathématique du maillon qui le suit. Nous reprenons dans la figure III.5 l'étape dédiée à l'optimisation des coûts de la chaîne d'optimisation.

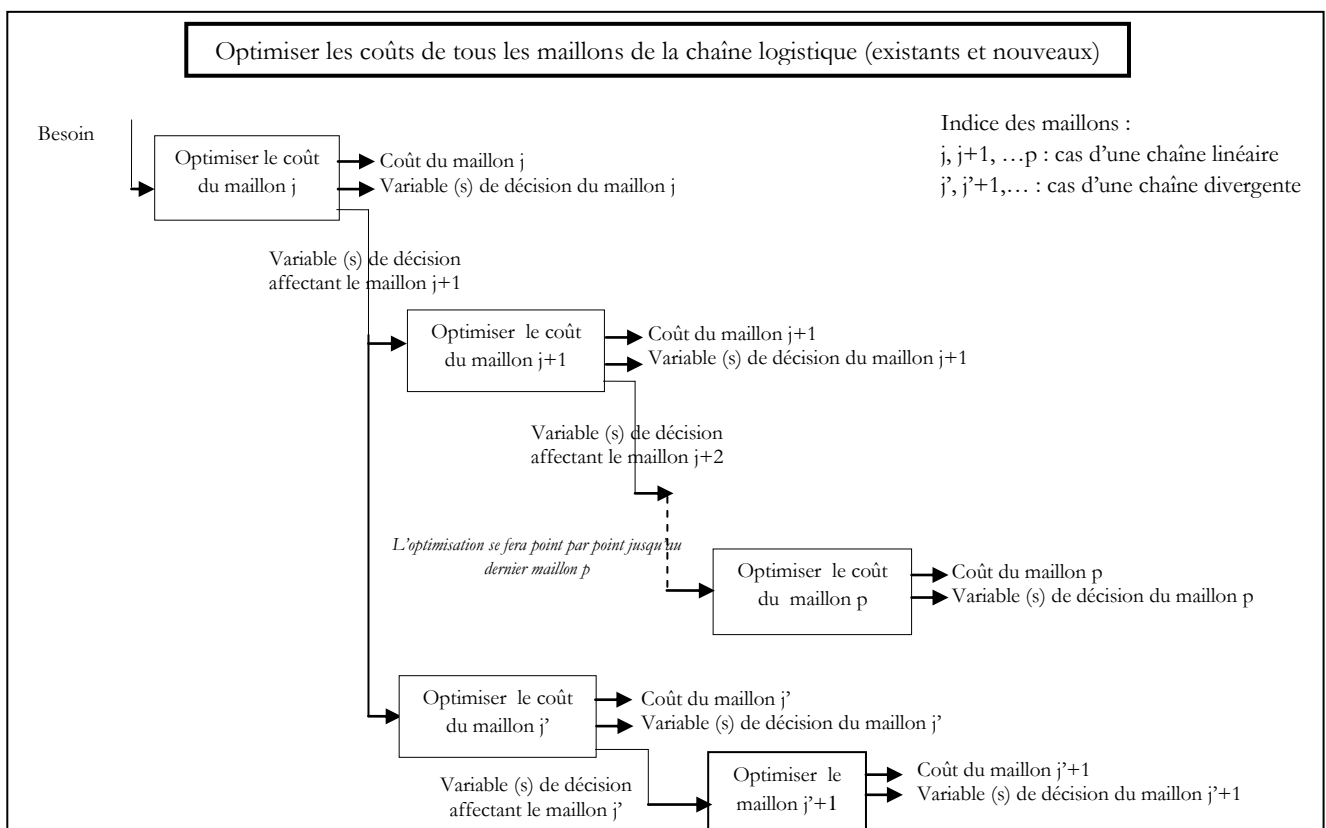


Figure III.5 : Optimisation des coûts des maillons de la chaîne logistique (Extraite de la figure III.4)

Pour être générique, notre démarche intègre deux cas (configuration en arbre) :

- le cas d'une chaîne logistique linéaire où l'optimisation d'un maillon influence celui qui le succède de façon linéaire.

- le cas d'une chaîne divergente où les variables de décisions d'un maillon (par exemple maillon j) n'affectent pas seulement le maillon qui le suit directement (par exemple maillon $j+1$) mais aussi un maillon se situant à une position plus lointaine dans la chaîne logistique (maillon j' par exemple).

L'approche d'optimisation ainsi que les modèles mathématiques adoptés seront détaillés dans le chapitre suivant.

3.5. Condition de validation d'une conception produit/chaîne logistique

On vérifie si le coût du produit conçu satisfait le coût prédéterminé ou estimé par l'entreprise pour que le produit soit financièrement rentable.

Si oui, on valide la conception du produit et sa chaîne logistique optimisée. Sinon, il sera nécessaire d'apporter des modifications soit sur la maquette numérique, soit sur les nouveaux maillons. On revient alors à l'étape initiale pour une nouvelle itération.

3.6. Synthèse

La démarche ainsi présentée est basée sur l'approche PLM. En effet, la maquette numérique est au cœur de la démarche. Tous les partenaires de la chaîne logistique intègrent leurs contraintes à travers cette maquette. La démarche offre la possibilité de faire des modifications à tout moment pour faire face à l'environnement changeant que connaissent les chaînes logistiques actuelles.

A chaque itération représentant une conception donnée du produit, on optimise la chaîne logistique associée. L'optimisation de la chaîne logistique se fait point par point, une solution optimale d'un maillon devient une contrainte pour la conception d'un autre maillon. On évite ainsi d'avoir des problèmes mathématiques difficiles à résoudre rencontrés dans l'approche globale tout en gardant une certaine autonomie à chaque maillon (optimisation locale).

Nous formaliserons notre démarche par une modélisation avec le langage UML.

4. Modélisation UML de la démarche proposée

4.1. Diagramme de classes

Le diagramme de classes permet une modélisation statique du système. Il décrit les différentes classes qui le constituent ainsi que les relations entre elles. Le diagramme (Figure III.6) modélise les différentes classes nécessaires pour notre démarche.

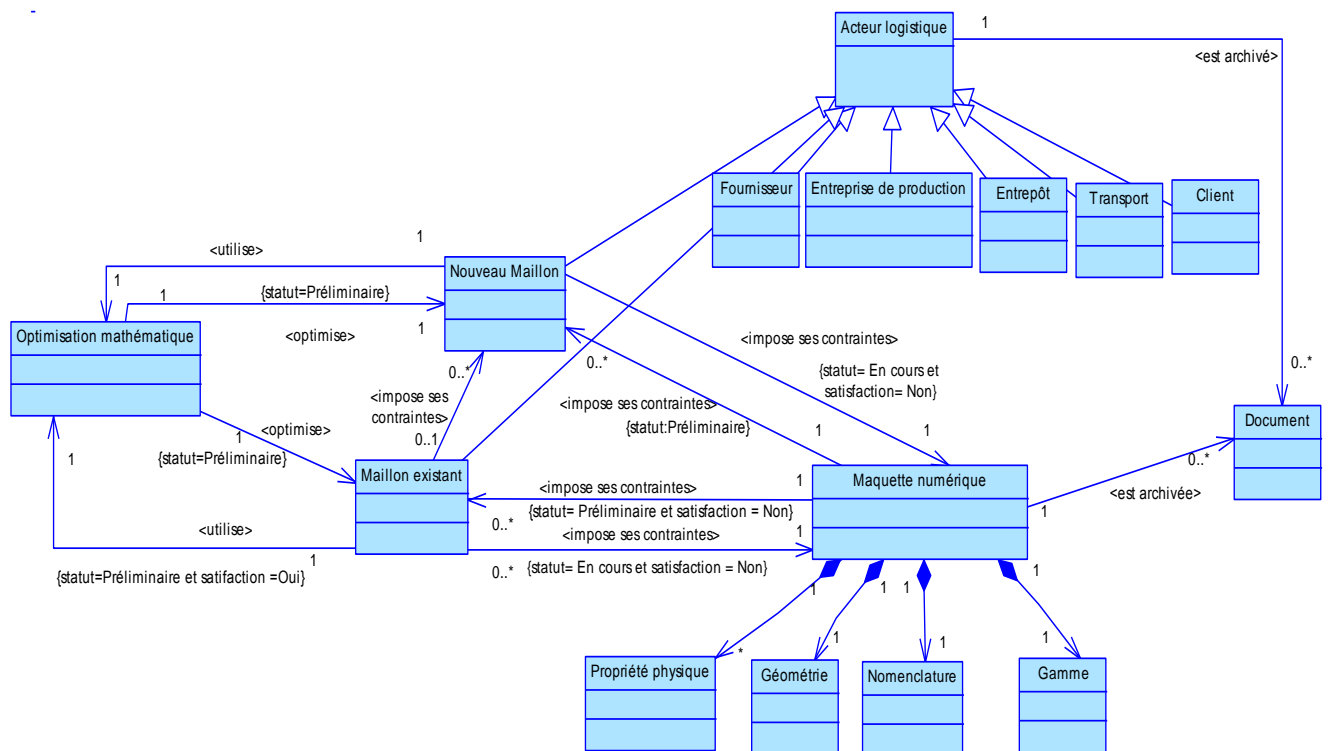


Figure III.6 : Diagramme de classes modélisant la démarche proposée

4.1.1. Classe « Maquette numérique »

La maquette numérique est la représentation numérique du produit, elle peut nous fournir les informations suivantes sur le produit : sa nomenclature, sa géométrie, ses propriétés physiques et sa gamme de fabrication.

Cette classe est caractérisée par un attribut booléen « statut », cet attribut donne une information sur l'état d'avancement de la conception. L'attribut « statut » est une variable qui peut prendre deux valeurs :

- « statut = en cours », ce qui veut dire que la conception sur la maquette numérique du produit est en cours.
- « statut = préliminaire » ce qui veut dire qu'on a élaboré une conception préliminaire qui n'est pas finale, car à ce stade la modification de la maquette numérique est toujours possible.

4.1.2. Classe « Acteur logistique »

La classe « Acteur logistique » est une généralisation des classes représentant les maillons de la chaîne logistique, à savoir le fournisseur, l'entreprise de production, l'entrepôt, le transport et le client. C'est aussi une généralisation des classes « maillon existant » et « nouveau maillon ». Nous rappelons que nous avons considéré que la chaîne logistique se compose de maillons qui existent déjà et de nouveaux maillons qu'il est nécessaire de concevoir.

Le maillon existant est un maillon qui est préalablement disponible dans la chaîne logistique. Le concepteur doit satisfaire les contraintes de ce maillon tout en satisfaisant l'intégralité des fonctions techniques imposées par le cahier des charges du client.

Le nouveau maillon est un maillon nécessaire dans la chaîne logistique du nouveau produit. Il sera déterminé en prenant en considération les contraintes de la conception préliminaire du produit et celles des maillons existants.

Cette classe est caractérisée par un attribut booléen « satisfaction » qui donne une information sur la satisfaction des contraintes de ce maillon par la conception en cours. L'attribut « satisfaction » est une variable qui peut prendre deux valeurs :

- « Satisfaction = oui » ce qui signifie que toutes les contraintes de ce maillon sont satisfaites.
- « Satisfaction = non » ce qui signifie qu'il existe au moins une contrainte dans ce maillon qui n'est pas satisfaite par la conception en cours.

Initialement, vu que la maquette numérique du produit n'est pas encore réalisée, toutes les contraintes des maillons existants et celles des nouveaux maillons, ne sont pas satisfaites. Nous avons donc :

- Statut = en cours
- Satisfaction = non

4.1.3. Classe « Optimisation mathématique »

La classe « optimisation mathématique » représente le modèle mathématique nécessaire pour l'optimisation de chaque maillon de la chaîne logistique. Les modèles mathématiques ont comme objectifs la minimisation du coût d'approvisionnement, du coût de production, du coût de stockage et du coût de transport. Le détail des modèles mathématiques proposés fera l'objet du chapitre suivant.

4.1.4. Classe « Document »

La classe « Document » représente l'entité qui permet l'archivage des données et la capitalisation des connaissances. L'effort de capitalisation permettra 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.

Ici, les données concernent principalement les contraintes des maillons de la chaîne logistique et les fichiers CAO décrivant le produit au cours des différentes étapes de sa conception.

4.2. Diagramme de séquences

Le diagramme de séquences a comme objectif de spécifier les messages et l'ordre dans lequel ils sont échangés entre les différentes classes. Il présente l'aspect dynamique de notre modélisation.

Notons que le diagramme de séquences a été divisé en plusieurs parties pour mieux en expliciter le contenu.

4.2.1 : Conception de la maquette numérique

La figure III.7 représente le diagramme de séquences modélisant l'intégration des contraintes au niveau de la maquette numérique.

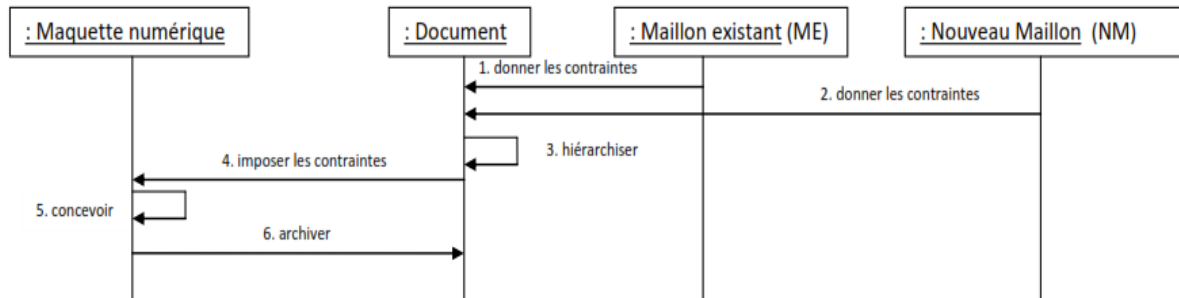


Figure III.7 : Diagramme de séquences - Intégration des contraintes

Initialement, la classe « maillon existant » va imposer ses contraintes sur la conception de la « maquette numérique », de même pour la classe « nouveau maillon ».

Au cours de la conception, l'attribut « statut » de la classe « maquette numérique » est toujours égal à « en cours ».

A cette étape, la conception va essayer de satisfaire les contraintes imposées du cahier de charges du client et en parallèle penser aux contraintes qu'imposent les deux types de maillons selon leur ordre d'importance.

Notons que le client est considéré comme maillon existant, son cahier de charge sera pris en considération en premier lieu.

La fin de la conception préliminaire est caractérisée par le basculement de la valeur de l'attribut « statut » de « en cours » à « préliminaire ». Cette première conception est archivée dans la classe « Document ».

4.2.2. Conception des maillons de la chaîne logistique

Nous vérifions si cette conception du produit s'adapte aux maillons existants de la chaîne logistique ou qu'il est nécessaire d'ajouter de nouveaux maillons. Il se peut aussi qu'il soit indispensable de modifier certains maillons existants.

Nous modélisons ces deux cas :

- **Scénario 1 : Nécessité de reconfigurer certains maillons existants**

Dans ce cas (figure III.8), il faudrait apporter les modifications nécessaires sur les maillons existants pour satisfaire la maquette numérique. Dans ce cas, c'est la « maquette numérique » qui impose ses contraintes sur « les maillons existants ».

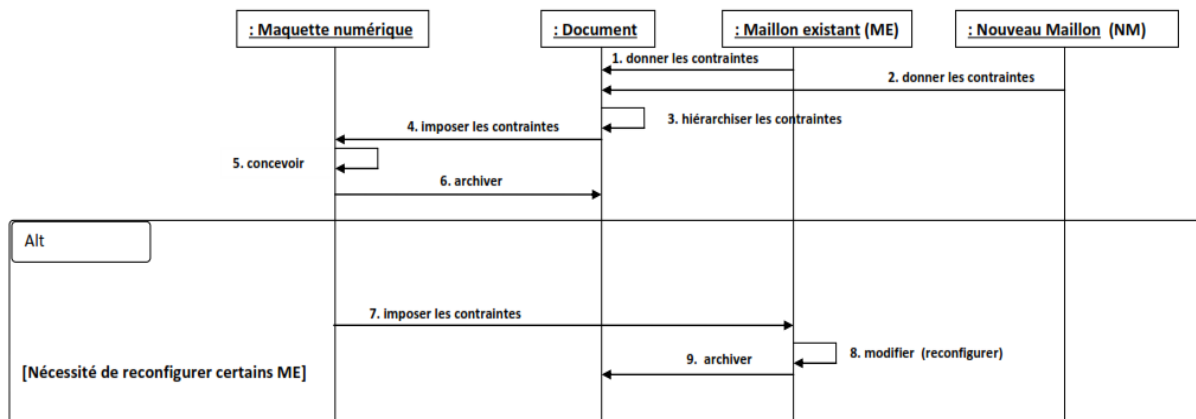


Figure III.8 : Diagramme de séquences – Nécessité de reconfigurer certains maillons existants (scénario 1)

On procède de la façon suivante :

- On détermine les maillons existants auxquels le produit n'est pas adapté.
- On passe ensuite à la reconfiguration des maillons qui ne sont pas satisfaits par la conception.
- On archive dans la base de données. Cette opération est traduite par l'association entre la classe « Maillon existant » et la classe « Document ».

- **Scénario 2 : Nécessité d'ajouter de nouveaux maillons**

Dans ce cas (Figure III.9), ce sont « la maquette numérique » et « les maillons existants » qui imposent leurs contraintes pour la conception du « nouveau maillon »

Une fois le nouveau maillon déterminé, toutes les informations le concernant sont archivées. Ceci est traduit par l'association entre la classe « Nouveau Maillon » et la classe « Document ».

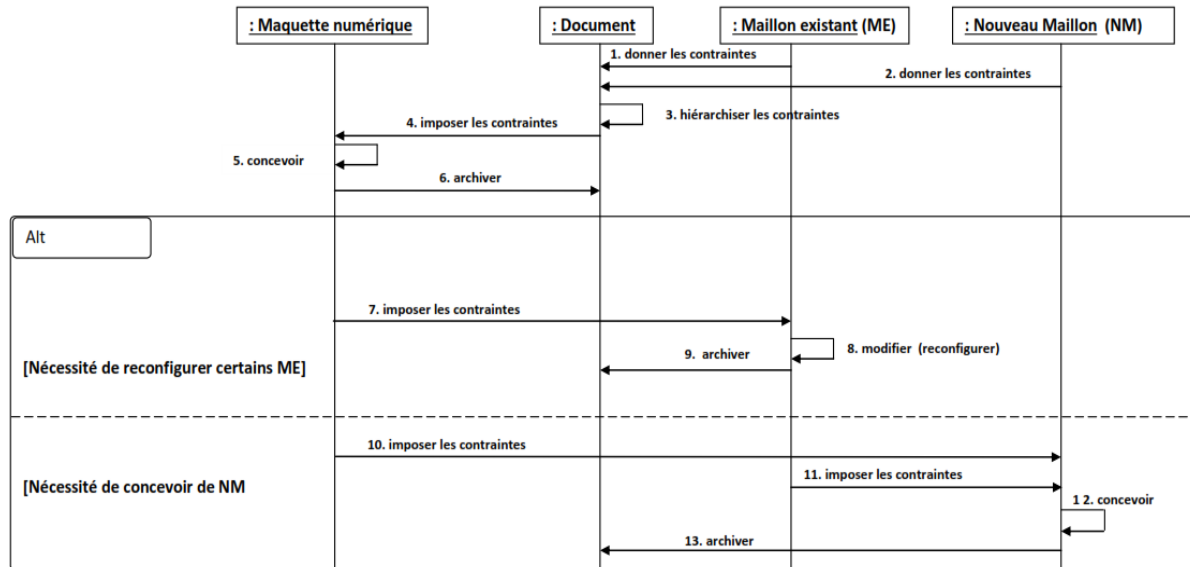


Figure III.9 : Diagramme de séquences – Nécessité de concevoir de nouveaux maillons (scénario 2)

Nous précisons qu'à ce niveau là, les décisions prises concernant la conception des maillons de la chaîne logistique sont essentiellement stratégiques (sélection des fournisseurs, choix des entrepôts, choix des moyens de transport, investissement au niveau du site de production,...).

Les décisions tactiques à savoir l'optimisation des flux entre les différents maillons seront considérées dans les étapes suivantes.

4.2.3. Optimisation du coût des maillons de la chaîne logistique

Une fois le produit conçu et les maillons de la chaîne logistique déterminés, on suit les étapes suivantes (Figure III.10) :

- On priorise les différents maillons (existants et nouveaux) pour avoir l'ordre selon lequel se fera l'optimisation.

- On optimise maillon par maillon en utilisant le modèle mathématique d'optimisation relatif à chaque maillon. Ceci est représenté par les associations entre la classe « optimisation mathématique » et les classes « maillon existant » ou « nouveau maillon ». Nous rappelons que l'optimisation d'un maillon prend en considération les solutions du modèle mathématique d'optimisation du maillon qui le précède.

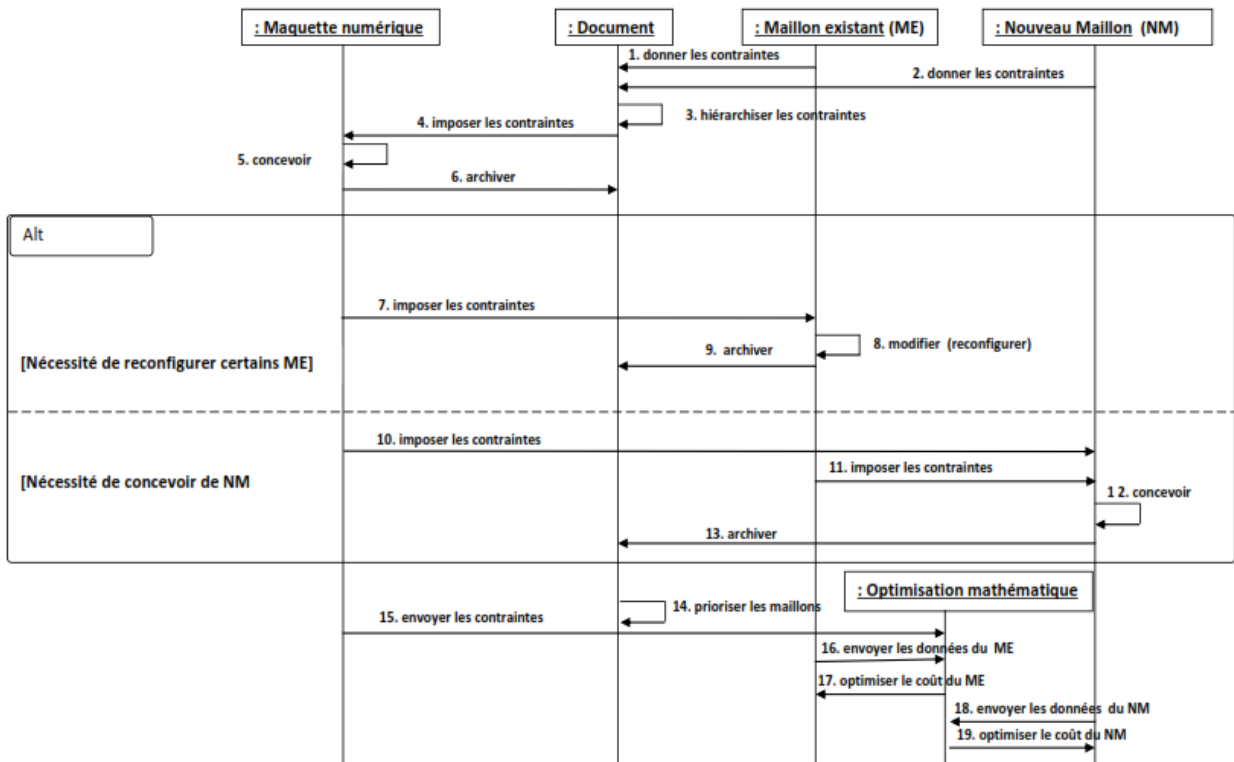


Figure III.10 : Diagramme de séquences – Optimisation des maillons de la chaîne logistique

Par la suite, on vérifie si le coût du produit tout au long de sa chaîne logistique est inférieur à un coût objectif estimé par l'entreprise (Figure III.11) :

- Si oui, on archive la conception du produit (maquette numérique) et la chaîne logistique associée (ayant un coût optimal).
- Sinon, il est nécessaire de revoir la conception du produit (agir sur la maquette numérique) ou bien faire des modifications sur les maillons conçus. On revient alors à l'état initial pour une nouvelle itération.

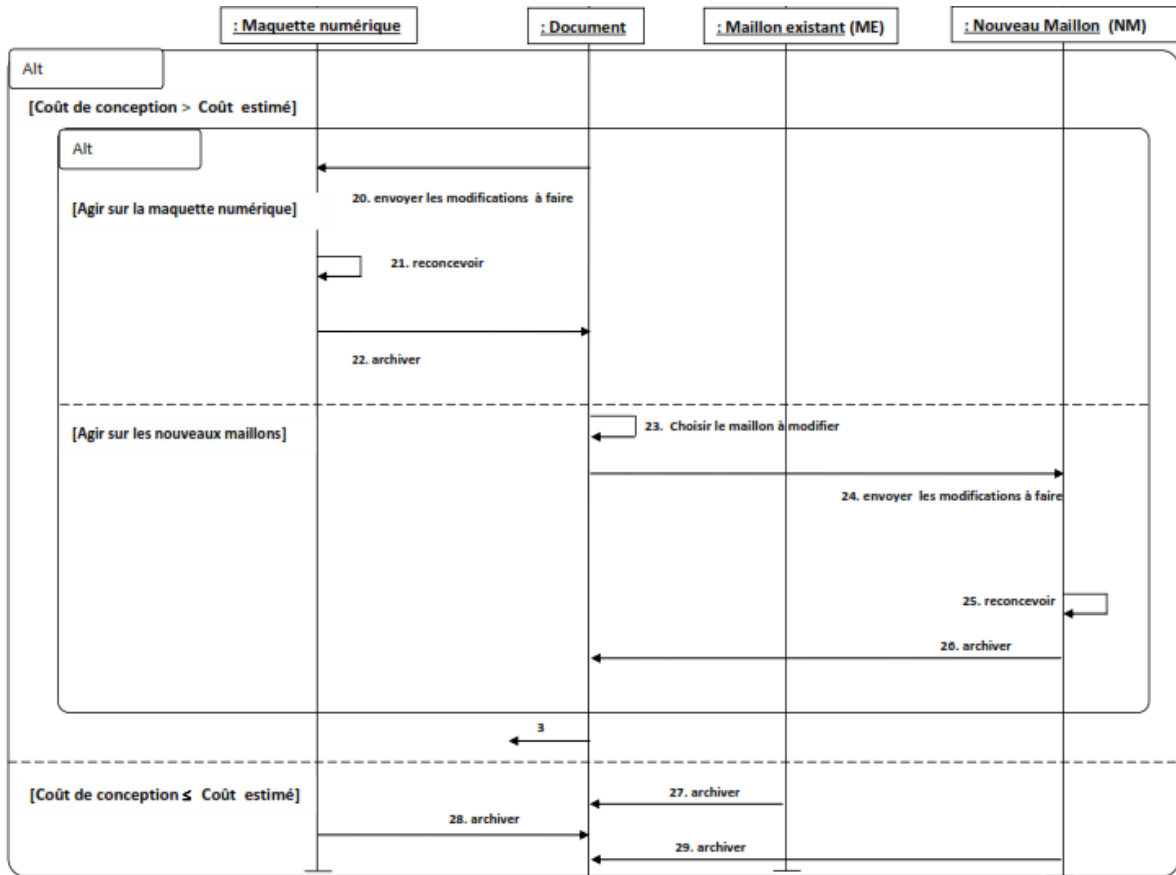


Figure III.11 : Diagramme de séquences – Condition de validation conception produit/chaîne logistique

Conclusion

Appliquer la vision PLM signifie être capable de simuler la réalité des produits d'une manière virtuelle : la vie complète du produit et de son environnement sous l'angle de la conception en intégrant tous les partenaires en mode collaboratif (Debeacker, 2004).

En effet, la méthodologie proposée de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique se base sur cette vision. C'est une démarche hybride combinant PLM et modèles mathématiques, elle réunit trois aspects fondamentaux : organisationnel, technologique et mathématique (Figure III.12).

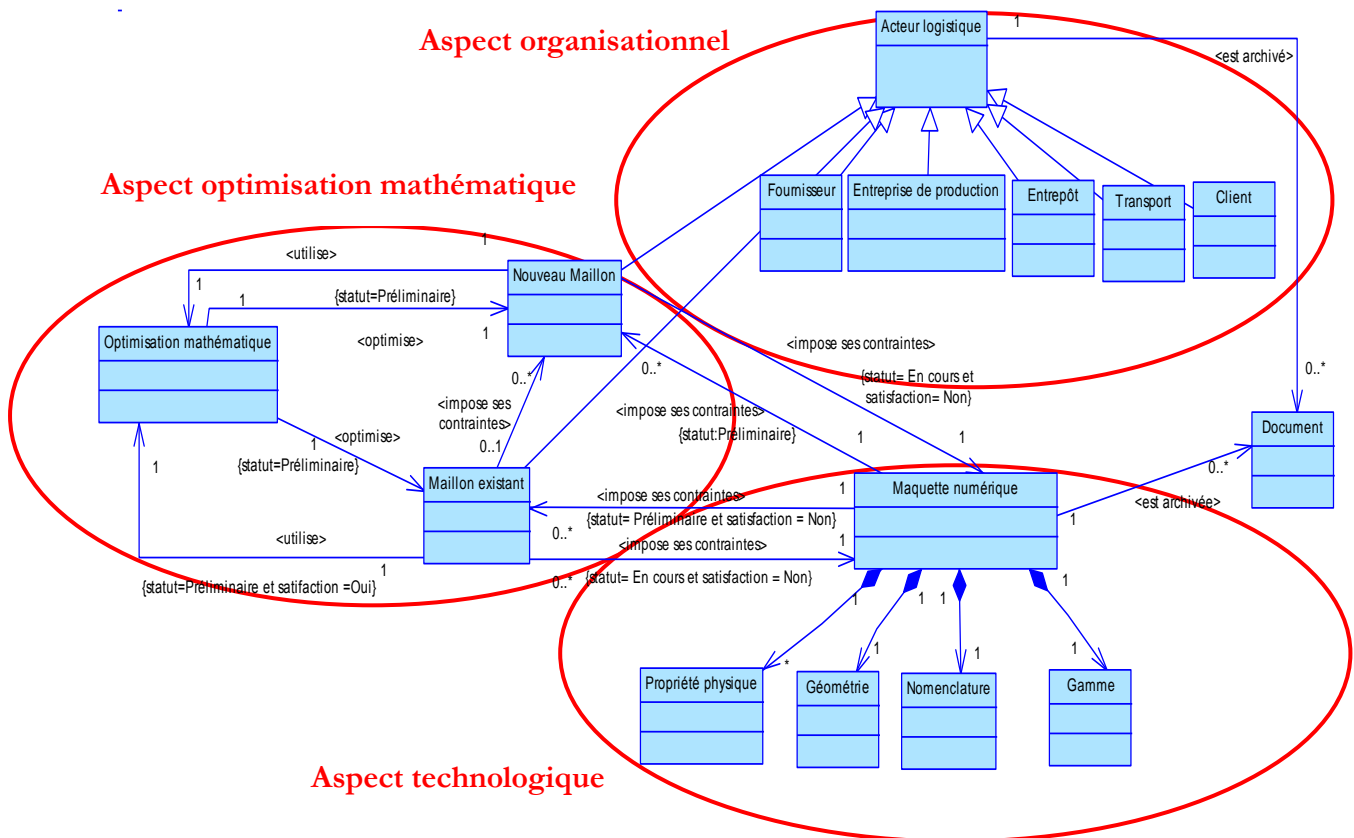


Figure III.12 : Les trois aspects de la démarche proposée

- L'aspect organisationnel : par l'intégration de tous les acteurs de la chaîne logistique responsables des principales étapes du cycle de vie du produit.
- L'aspect technologique : tous les acteurs sont réunis autour de la maquette numérique. Cette maquette numérique conditionne et structure le conception de la chaîne logistique.
- L'aspect optimisation mathématique : une approche mathématique permet de construire une décision structurée et rationnelle. Les modèles mathématiques assurent l'optimisation des coûts des différents maillons de la chaîne logistique.

Ainsi, si l'optimisation des chaînes logistiques était traitée dans la littérature comme une problématique purement mathématique, notre approche, quant à elle, se veut un carrefour entre science (modèles mathématiques) et technologie (maquette numérique, technologies de

l'information et communication). Elle alterne modèles mathématiques, vérification avec la réalité et rectification sur la maquette numérique.

La combinaison du PLM et des modèles mathématiques permettra de traiter le problème de façon plus réaliste, sans pour autant recourir à des modèles complexes. La complexité sera traitée partie par partie, avec une optimisation continue.

L'approche d'optimisation sera locale : nous optimisons chaque partenaire de la chaîne logistique. Le PLM assurera l'intégration des différents partenaires de la chaîne logistique. Nous évitons ainsi les modèles complexes associés au problème intégré, nécessitant un temps de résolution élevé ou se basant sur des hypothèses irréalistes ou alors qui ne sont résolus qu'avec des méthodes approchées.

Le chapitre qui suit, décrit l'approche d'optimisation adoptée. On y détaille les modèles mathématiques utilisés pour l'optimisation de chaque maillon de la chaîne logistique.

Chapitre 4 :
Optimisation mathématique de la
chaîne logistique

Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons d'expliciter l'approche d'optimisation adoptée, il s'agit d'une optimisation point par point qui consiste en une suite d'optimisations locales des différents maillons constituant la chaîne logistique. La centralisation des décisions étant assurée par le PLM à travers la maquette numérique.

Nous rappelons que la chaîne logistique étudiée se compose de fournisseurs, d'une entreprise de production (qui sera aussi responsable de la conception du produit), d'entrepôts de stockage et de clients. Des moyens de transport assurent la connexion entre les maillons.

Nous traitons le problème de conception de la chaîne logistique comme un problème d'allocation ayant pour objectif l'optimisation des flux échangés entre les différents maillons. Toutefois, la conception du maillon « fournisseur » est considérée comme un problème de localisation-allocation puisqu'il s'agit de sélectionner les meilleurs fournisseurs puis de déterminer les quantités optimales à approvisionner.

Nous nous intéressons à optimiser les coûts de chaque maillon de la chaîne logistique. Il s'agit de minimiser les coûts d'approvisionnement, les coûts de production, les coûts de stockage et les coûts de transport.

Nous détaillons pour chaque maillon, les différentes hypothèses et composantes du modèle mathématique. Nous utilisons la programmation linéaire pour la formulation mathématique des modèles d'optimisation.

1. Caractéristiques des modèles d'optimisation

Dans la bibliographie, les modèles de conception des chaînes logistiques se distinguent principalement par des caractéristiques exigées par les cas d'application. Parmi ces caractéristiques, nous pouvons citer :

- Nature des objectifs : l'objectif poursuivi par l'optimisation de la chaîne logistique peut être la minimisation du coût, la maximisation du profit, la minimisation des délais ou l'optimisation d'une fonction multi-objectifs.

- Nombre d'échelons : les échelons considérés généralement sont (d'amont en aval) : les fournisseurs, les sites de production, les centres de distribution et les clients. D'autres échelons peuvent intervenir, par exemple dans le cadre de la chaîne logistique inverse ;
- Nombre de produits (mono/multi-produits) : un seul ou plusieurs produits peuvent être considérés ;
- Nombre des périodes (mono/multi-périodes) : l'optimisation peut se faire sur une période de temps pour laquelle les données sont agrégées, ou sur plusieurs périodes de temps ;
- Nature des paramètres des modèles : Les différentes données nécessaires pour concevoir une chaîne logistique (besoins en matières, demandes des articles, délais de transport, etc....) peuvent être intégrées dans les modèles comme des données déterministes ou suivre une loi de probabilité (donnée stochastique).

La conception de la chaîne logistique regroupe des décisions concernant l'organisation des opérations permettant la production et la distribution des produits, du fournisseur jusqu'au client. Nous nous intéressons particulièrement aux décisions stratégiques voire tactiques.

Le problème de conception de la chaîne logistique, dans notre cas, est essentiellement un problème d'allocation ayant pour objectif l'optimisation des flux échangés entre les différents maillons. La conception du maillon « fournisseur » est traitée comme un problème de localisation-allocation puisqu'il s'agit de sélectionner les meilleurs fournisseurs puis de déterminer les quantités optimales à approvisionner.

Les modèles sont mono-produits puisque nous sommes dans le cas de la conception d'un seul produit et nous cherchons à optimiser sa chaîne logistique. Toutefois, les modèles relatifs aux maillons « fournisseur » et « entreprise de production » sont multi-produits puisqu'ils prennent en considération la nomenclature du produit. Tous les modèles sont multi-périodes et déterministes.

2. Approche d'optimisation adoptée

Nous adoptons une optimisation point par point : C'est un cas particulier du mode de gestion décentralisée (Galasso, 2007). Les maillons de la chaîne logistique restent autonomes par rapport

à la prise de décision, mais elles ne communiquent qu'avec leurs partenaires directs en amont et en aval par rapport au flux de produit. Le mode de gestion point par point semble actuellement le plus répandu dans l'industrie, il est cohérent avec la méthode de gestion de production la plus utilisée MRP (*Material Requirement Planning*) et laisse des marges de manœuvre à chaque partenaire (Costa-Affonso, 2008).

En effet, il s'agit d'une optimisation locale : nous optimisons les coûts de chaque maillon, ses variables de sortie seront les variables d'entrée du maillon qui le suit.

Un regroupement centralisé des informations permettra l'amélioration des résultats obtenus par optimisation locale. Cette centralisation se fera à travers le PLM en adoptant la méthodologie présentée dans le chapitre précédent.

Nous choisissons de prioriser les différents maillons de la chaîne logistique selon le flux du produit (du fournisseur au site de production puis aux entrepôts en utilisant des moyens de transport jusqu' à l'arrivée chez le client). Nous explicitons notre approche d'optimisation dans la figure IV.1.

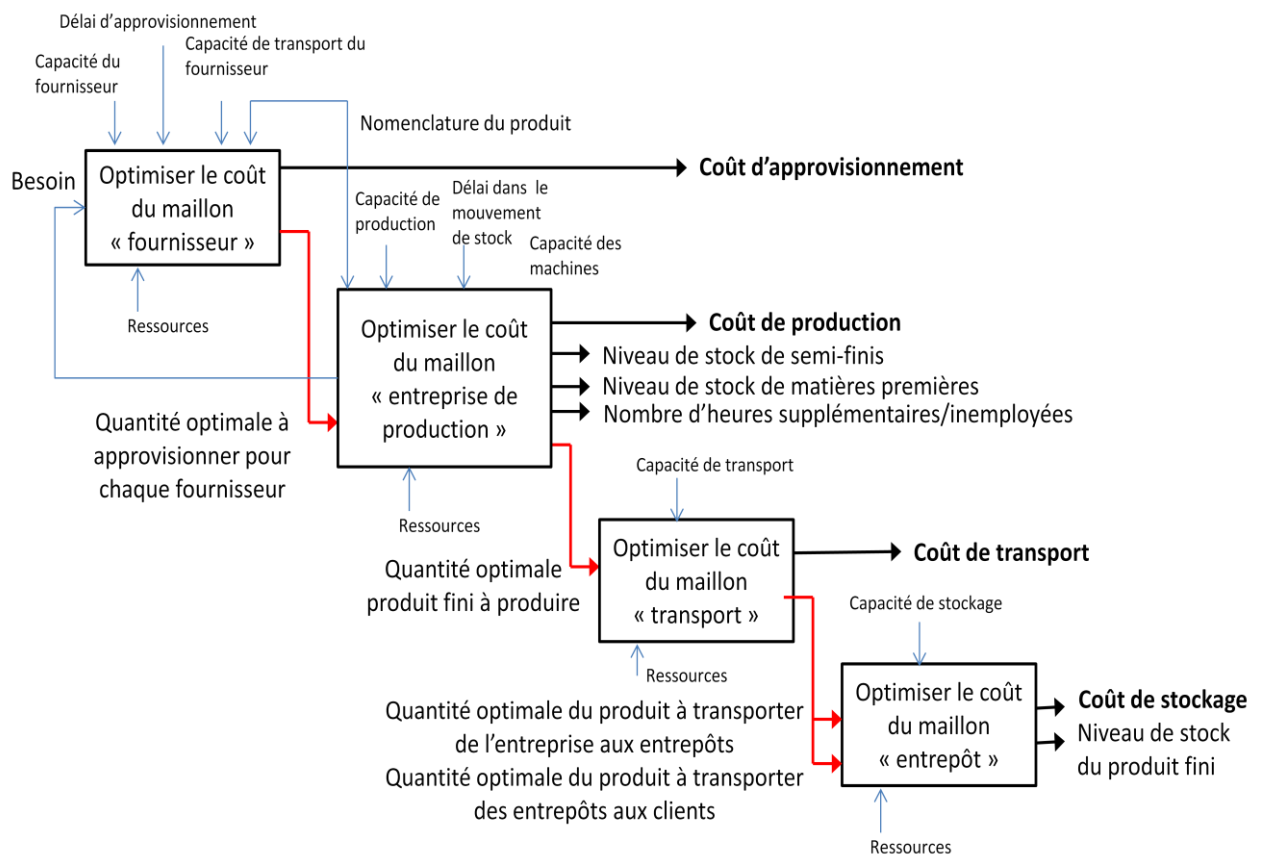


Figure IV.1 : approche d'optimisation adoptée

3. Optimisation des maillons de la chaîne logistique

3.1. Optimisation du maillon « Fournisseur »

Selon notre approche PLM, le fournisseur est impliqué dès la phase de conception du produit. Cette implication lui permet, non seulement de répondre aux spécifications de l'entreprise, mais aussi de contribuer lui-même à la définition de ces spécifications.

La sélection des fournisseurs devient ainsi une décision stratégique qui a un impact crucial sur la performance globale de toute l'entreprise. La capacité du donneur d'ordres à produire un produit de qualité, à un coût compétitif est fortement influencée par les performances de ses fournisseurs d'où la nécessité de bien les sélectionner.

3.1.1. Critères de sélection des fournisseurs

La recherche dans la sélection des partenaires remonte aux années soixante, avec les premiers travaux de Dickson qui a identifié 23 critères présentés dans le tableau IV.1, utilisés par les entreprises pour sélectionner leurs fournisseurs (Dickson, 1966).

Tableau IV.1: Critères de sélection des fournisseurs selon Dickson (1966)

Critères de sélection des fournisseurs
- Prix
- Livraison
- Qualité
- Capacité de production
- Localisation géographique
- Capacité technique
- Gestion et organisation
- Réputation et position dans l'industrie
- Situation financière
- Performance passée
- Services de réparation
- Attitude
- Habilité d'emballage
- Contrôle des opérations
- Formation et support
- Conformité des processus
- Relations sociales
- Système de communication
- Réciprocité de la relation
- Impression
- Désir de faire des affaires
- Volume des achats dans le passé
- Politique de garantie

Des études basées essentiellement sur des enquêtes auprès d'entreprises donnent différents ordres de priorités à chacun de ces critères ou alors ajoutent d'autres critères spécifiques à leur cas d'entreprise (Verma et Pullma, 1998 ; Katsikeas et al., 2004 ; Ho et al., 2010).

Ce que nous pouvons dégager de l'ensemble de ces travaux est que :

- D'une part, les critères de sélection des fournisseurs ainsi que le rang affecté à chaque critère varient d'une entreprise à l'autre.
- D'autre part, le choix des fournisseurs est une décision multicritère qui implique souvent la considération simultanée de plusieurs critères qui sont parfois conflictuels, ce qui rend le processus de sélection des fournisseurs compliqué. Plusieurs méthodes ont été publiées dans la littérature pour résoudre ce problème.

Le paragraphe qui suit présente les principales méthodes utilisées pour la sélection des fournisseurs.

3.1.2 Méthodes de sélection des fournisseurs

Nous nous appuyons sur l'analyse des méthodes de sélection proposées dans (De Boer et al, 2001 ; Bouchriha, 2002 ; Aguezzoul, 2005 ; Huang et Keskar, 2007 ; Ho et al., 2010 ; Zouggar, 2009) pour présenter les principales méthodes pour la sélection des fournisseurs :

- **Modèles linéaires de pondération** qui consiste à attribuer un poids à chaque critère de manière subjective (selon l'expérience et l'appréciation de l'acheteur). Un score est calculé pour chaque fournisseur en effectuant la somme des performances des fournisseurs relatives à chaque critère multipliées par le facteur de pondération associé. Nous trouvons dans cette catégorie les méthodes suivantes :

- Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) est une méthode qui a été le plus utilisée dans la littérature pour résoudre le problème de sélection des fournisseurs (Nydick et Hill, 1992 ; Mazella et Rangone, 2000). Le principe de base de la méthode AHP consiste en une comparaison par paire des différents fournisseurs pour déterminer la position relative d'un fournisseur par rapport à un critère donné.

- Méthode FST (Fuzzy Sets Theory) (Kumar et al., 2004 ; Sarkar et Mohapatra, 2006). La théorie des ensembles flous permet de modéliser l'incertitude et l'imprécision relatives aux valeurs des poids attribués aux critères.

- **Méthodes de programmation mathématique** : Ils représentent une fonction objectif à optimiser (essentiellement minimiser des coûts) sous des contraintes liées au fournisseur, au donneurs d'ordre, etc. les techniques les plus utilisées sont la programmation linéaire/ non linéaire en nombre entiers (Hong et Hayya, 1992), la programmation linéaire/non linéaire en nombres mixtes (Rayaraman et al., 1999 ; Ghodsypour et O'Brien, 2001).

D'autres auteurs ont utilisé la programmation mathématique multiobjectif (Weber et Current, 1993).

- **Méthodes basées sur le coût total** : Ce sont des techniques qui nécessitent l'identification et le calcul des coûts générés par les différentes activités intervenant dans l'opération d'achat telles que le contrôle de la qualité des produits, le transport, les frais administratifs, etc. Nous trouvons principalement dans cette catégorie la méthode ABC (Activity Based Costing). Une application de cette méthode pour la sélection du fournisseur chez un donneur d'ordres, a été proposée dans (Degraeve et Roodhooft, 1999).

Chacune des méthodes précitées présentent des avantages et des inconvénients que nous résumons dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients des méthodes, tiré de (Aguezoul, 2005)

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Pondération	<ul style="list-style-type: none"> * Rapide et simple à utiliser * Tient compte des critères subjectifs * Mise en œuvre peu coûteuse. 	<ul style="list-style-type: none"> * Dépend du jugement humain * Pas de possibilité d'introduire des contraintes dans le modèle.
Programmation mathématique	<ul style="list-style-type: none"> * Propose une solution optimale * Possibilité d'introduire ou non des contraintes dans le modèle. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ne tient pas compte des critères subjectifs.
Méthode basée sur le coût	<ul style="list-style-type: none"> * Aide à identifier la structure de tous les coûts * Permet de négocier les valeurs des coûts avec les fournisseurs * Très flexible. 	<ul style="list-style-type: none"> * Accès aux données sur les coûts parfois limité * Expression de certains coûts en monétaire difficile.

3.1.3. Démarche adoptée pour le choix des fournisseurs

Notre démarche de choix des fournisseurs s'appuie dans un premier temps, sur une méthode de pondération, à savoir la méthode AHP afin de présélectionner les fournisseurs adéquats sur la base de critères qualitatifs et quantitatifs et dans un deuxième temps, une méthode mathématique par la programmation linéaire pour optimiser le coût d'approvisionnement des fournisseurs retenus. Cette démarche est présentée dans la figure IV.2 :

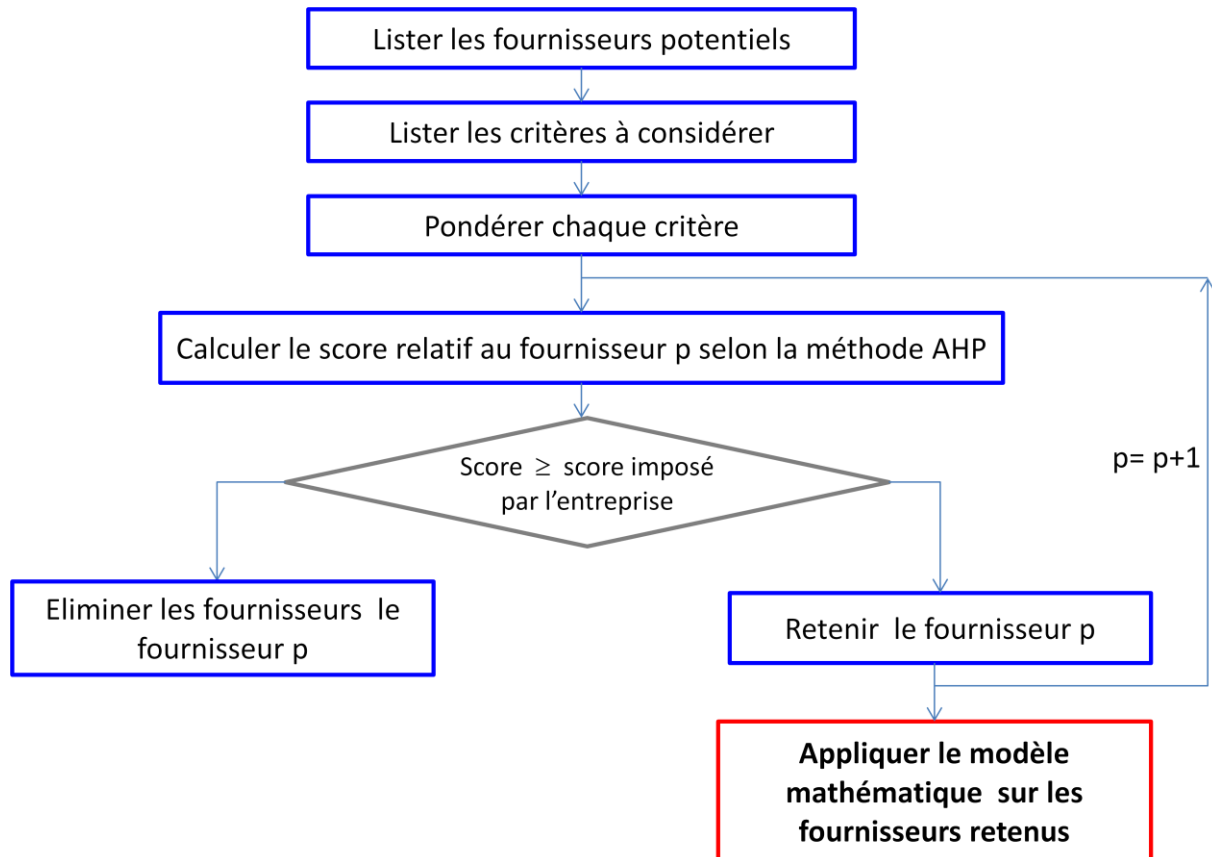


Figure IV.2 : Algorithme de la démarche de sélection des fournisseurs

Nous identifions d'abord pour chaque matière première, la liste des fournisseurs potentiels ainsi que les critères de sélection à prendre en considération. Nous déterminons un poids pour chaque critère ; cela consiste à évaluer chaque critère par rapport à tous les autres critères en utilisant une matrice d'agrégation (Tableau IV.3).

Tableau IV.3 : Matrice de détermination du poids de chaque critère

AHP	Critère 1	Critère 2	.....	Critère K	Moyenne géométrique	Poids
Critère 1	1	A12	.....	A1K	$M_1 = (\prod_{j=1}^K A_{1j})^{1/3}$	$P_1 = M_1/S$
Critère 2	A21	1	.....	A2K	$M_2 = (\prod_{j=1}^K A_{2j})^{1/3}$	$P_2 = M_2/S$
.
.
.
Critère K	AK1	AK2	.....	1	$M_K = (\prod_{j=1}^K A_{Kj})^{1/3}$	$P_K = M_K/S$
Somme	$\sum_{i=1}^K A_{i1}$	$\sum_{i=1}^K A_{i2}$	.....	$\sum_{i=1}^K A_{iK}$	$S = \sum_{i=1}^K M_K$	1

Avec A_{ij} : agrégation du critère i par rapport au critère j ; $A_{ii} = 1$

(Exemple : Si $A_{12}=2$, le critère 1 est deux fois plus important que le critère 2)

On établit une matrice comportant le jugement de chaque fournisseur par rapport à chaque critère (Tableau IV.4).

Tableau IV.4 : Matrice de jugement de chaque fournisseur

	Critère 1	Critère 2	.....	Critère K
Fournisseur 1	J_{11}	J_{12}	.....	J_{1K}
Fournisseur 2	J_{21}	J_{22}	.....	J_{2K}
.
.
.
Fournisseur P	J_{p1}	J_{p2}	.....	J_{pK}

Avec J_{pk} = le jugement du fournisseur p au regard du critère k

On calcule le score relatif à chaque fournisseur p :

$$S_p = \sum_{k=1}^K J_{pk} \times P_k \quad \text{où } P_k \text{ est le poids du critère k}$$

On choisit les fournisseurs admissibles, ayant un score supérieur au score imposé par l'entreprise. Ces fournisseurs présélectionnés sont ceux qui feront l'objet d'une optimisation par programmation mathématique.

3.1.4. Modélisation mathématique

Le modèle mathématique vise à minimiser le coût d’approvisionnement des matières premières (ou composants) nécessaires à la fabrication du produit, il se compose du coût d’achat et du coût de transport du fournisseur à l’entreprise de production.

Pour modéliser le produit en phase de conception (maquette numérique), nous prenons en considération à la fois les composants ou matières premières qui composent le produit (nomenclature) et la gamme de fabrication qu’il subit (opérations).

La nomenclature du produit adoptée est celle présentée dans la figure IV.3. Il s’agit d’une nomenclature à trois niveaux : produit fini (PF), produits semi-finis (SF) et matières premières (MP). Nous considérons deux types d’opérations :

- Une opération de transformation des matières premières en produits semi-finis
- Une opération d’assemblage des produits semi-finis.

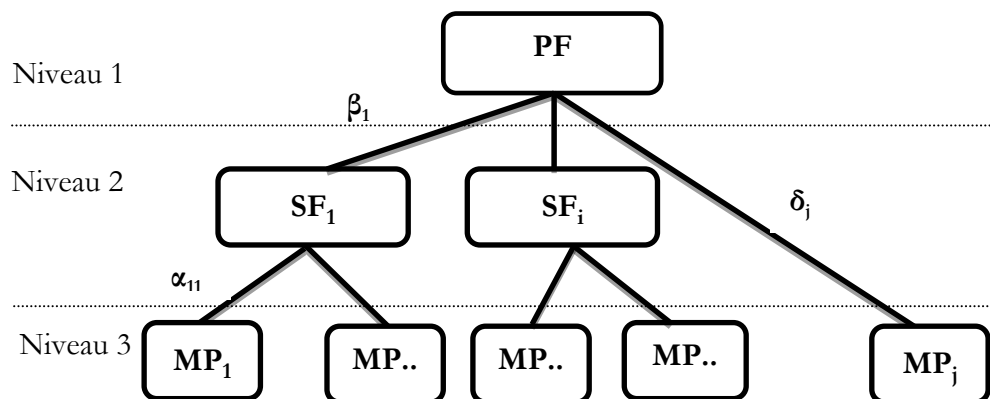


Figure. IV. 3 : Nomenclature adoptée

Avec :

- MP_j : matière première (ou composant) approvisionnée par l’entreprise
- SF_i : produit semi-fini fabriqué à partir des matières premières
- PF : produit fini
- α, β et δ : coefficients de nomenclature.

3.1.4.1. Indices et paramètres du problème

On considère les indices suivants :

I : l'ensemble des produits semi-finis $i, i \in \{1 \dots I\}$

J : l'ensemble des matières premières $j, j \in \{1 \dots J\}$

P : l'ensemble des fournisseurs $p, p \in \{1 \dots P\}$

M : l'ensemble des moyens de transport $m, m \in \{1 \dots M\}$

T : l'ensemble des périodes $t, t \in \{1 \dots T\}$

Nous considérons les paramètres suivants pour notre modèle :

$Cachat_{p,j,t}$: Coût d'achat unitaire de la matière première j du fournisseur p à la période t

$Ctransp_{p,m,j,t}$: Coût de transport de la matière première j du fournisseur p à la période t par le biais du moyen de transport m .

$Qmax_{p,j,t}$: Quantité maximale de matière première j qui peut être fournie par le fournisseur p à la période t .

$Captransp_{p,m}$: Capacité de transport du moyen de transport m du fournisseur p .

α_{ij} : nombre de composants j nécessaires pour la fabrication du produit semi-fini i .

β_i : nombre de produits semi-finis i nécessaires pour l'assemblage du produit fini.

δ_j : nombre de composants j nécessaires pour l'assemblage du produit fini.

Q_t : quantité prévisible du produit fini à la période t .

3.1.4.2. Variables de décision

On suppose que la quantité à s'approvisionner à la période t est livrée à la même période.

- $Q'_{p,m,j,t}$: Quantité à s'approvisionner (ou besoin) en matière première j du fournisseur p par le biais du moyen de transport m à la période t .
- $Q_{p,j,t}$: Quantité à s'approvisionner (ou besoin) en matière première j du fournisseur p à la période t .

Tel que
$$Q_{p,j,t} = \sum_{m=1}^M Q'_{p,m,j,t}$$

3.1.4.3. Fonction objectif d'approvisionnement

Le problème consiste à minimiser le coût d'approvisionnement qui se compose du coût d'achat et du coût de transport des matières premières.

$$\text{Min} \left(\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{achat_{p,j,t}} * Q_{p,j,t} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{transp_{p,m,j,t}} * Q'_{p,m,j,t} \right) \quad (1)$$

3.1.4.4. Contraintes

- **Contrainte de la quantité approvisionnée :**

$$Q_{p,j,t} \leq Q_{max_{p,j,t}} \quad \forall p, j, t \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^P Q_{p,j,t} = \left(\sum_{i=1}^I (\beta_i \times \alpha_{ij}) + \delta_j \right) \times Q_t \quad \forall j, t \quad (3)$$

- La quantité à s'approvisionner de chaque fournisseur p pendant la période t ne doit pas dépasser sa capacité.
- La quantité totale des matières premières à s'approvisionner est égale aux coefficients de nomenclatures multipliés par la quantité du produit final.

- **Contrainte de capacité :**

$$\sum_{j=1}^J Q'_{p,m,j,t} \leq Cap_{transp_{p,m,t}} \quad \forall p, m, t \quad (4)$$

La quantité de matière première j livrée par le fournisseur p pendant la période t par le moyen de transport m ne doit pas dépasser sa capacité (du moyen de transport m) à la période t.

Ainsi, l'optimisation du maillon « fournisseur » se fait en deux étapes. La première étape consiste à faire une présélection sur la base de critères quantitatifs et qualitatifs par la méthode AHP, cette étape permet ainsi de réduire le nombre de fournisseurs à optimiser par modèles mathématiques. La deuxième étape permet de choisir, parmi les fournisseurs présélectionnés, le ou (les) fournisseur(s) présentant un coût d'approvisionnement optimal en utilisant la programmation linéaire.

3.2 Optimisation du maillon « Entreprise de production »

L'entreprise « donneur d'ordres » constitue le maillon essentiel de la chaîne logistique. Dans notre cas, elle est chargée de la conception et la production du nouveau produit.

L'entreprise cumule deux rôles : partenaire de la chaîne logistique et entité centralisatrice. Grâce au PLM, elle doit gérer au mieux les informations et contraintes transmises par les acteurs avec lesquels elle est en relation, ainsi que ses propres contraintes.

En tant que maillon chargé de la production, elle assure la transformation des matières premières provenant des fournisseurs, en produits finis à destination du client. Nous adoptons la nomenclature de produit présentée précédemment (*cf. Figure IV. 3*).

3.2.1. Hypothèses

Pour la modélisation de notre problème, nous avons émis les hypothèses suivantes :

- Il n'y a qu'un seul site de production.
- Le site de production est composé d'ateliers de fabrication et d'assemblage, le coût de transport entre ateliers est supposé négligeable.
- Existence de stock de matières premières et des en-cours au sein de l'entreprise.
- Toutes les machines sont à capacité finie.

3.2.2. Indices

I : l'ensemble des produits semi-finis i , $i \in \{1 \dots I\}$

J : l'ensemble des matières premières j , $j \in \{1 \dots J\}$

K : l'ensemble des machines de production k , $k \in \{1 \dots K\}$

N : l'ensemble de nouvelles machines n , $n \in \{K + 1 \dots N\}$

T : l'ensemble des périodes t , $t \in \{1 \dots T\}$

3.2.3. Paramètres du modèle

α_{ij} : nombre d'unités du composant (matière première) j entrant dans la fabrication d'une unité du produit semi-fini i

β_i : nombre d'unités du produit semi-fini i entrant dans l'assemblage du produit fini

- δ_j : nombre d'unités de matière première j entrant dans l'assemblage du produit fini
 Cs_i : coût unitaire de stockage du produit semi-fini i
 Cs_j : coût unitaire de stockage de la matière première j
 $Cap_{k,t}$: capacité normale de production de la machine k durant la période t
 $CO_{k,t}$: coût d'une heure supplémentaire sur la machine k pendant la période t
 $CU_{k,t}$: coût d'une heure inemployée sur la machine k pendant la période t
 $Cp_{k,t}$: coût normal de production sur la machine k pendant la période t
 $Q_{j,t}$: quantité de matière première j approvisionnée pendant la période t
 $Q_{i,t}$: quantité de produit semi-fini i fabriquée pendant la période t
 $D_{i,t}$: demande externe du produit semi-fini i à la période t
 $Tu_{i,k}$: temps unitaire de production d'un produit semi-fini i sur la machine k
 Tu_k : temps unitaire d'assemblage du produit fini sur la machine k
 L_j : délai d'approvisionnement de la matière première j
 L_i : délai de fabrication du produit semi-fini i

3.2.4. Variables de décision

- Q_t : quantité du produit fini produite pendant la période t
 $I_{i,t}$: niveau de stock du produit semi-fini i à la période t
 $I_{j,t}$: niveau de stock de la matière première j à la période t
 $O_{k,t}$: nombre d'heures supplémentaires sur la machine k à la période t
 $U_{k,t}$: nombre d'heures inemployées sur la machine k à la période t

3.2.5. Fonction objectif de production

Le problème consiste à minimiser le coût de production qui se compose des coûts de stockage de matières premières et des produits semi-finis au sein de l'entreprise, des coûts d'exploitation des machines (coût normal de production, coûts des heures supplémentaires et des heures inemployées).

$$\begin{aligned} \text{Min} \left(\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (Cs_j \times I_{j,t}) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (Cs_i \times I_{i,t}) + \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T Cp_{k,t} \times Q_t + \right. \\ \left. \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T (CO_{k,t} \times O_{k,t} + CU_{k,t} \times U_{k,t}) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Nous avons pris en considération les machines qui existent déjà en entreprise ($k \in \{1 \dots K\}$) et les nouvelles machines spécialement acquises pour le nouveau produit ($n \in \{K + 1 \dots N\}$).

3.2.6. Contraintes

- **Contraintes de respect de la capacité de production**

- * **Cas des machines de transformation**

$$\text{Cap}_{k,t} + O_{k,t} = \sum_{i=1}^I (\text{Tu}_{i,k} * \beta_i * Q_t) + U_{k,t} \quad \forall k, t \quad (6)$$

La contrainte (6) exprime la relation entre la charge d'une machine k et sa capacité, dans le cas des machines utilisées pour l'opération de transformation de la matière première en produit semi-fini. La somme de la capacité d'une machine k en unité horaire et des heures supplémentaires sur celle-ci doit être égale à la somme du temps nécessaire à la production et les heures inemployées sur cette machine.

Notons que des heures supplémentaires sont prévues sur une machine quand sa charge dépasse sa capacité. Dans le cas contraire, on a des heures inemployées.

Les temps de réglages des machines sont négligés.

- * **Cas des machines d'assemblage**

$$\text{Cap}_{k,t} + O_{k,t} = (\text{Tu}_k * Q_t) + U_{k,t} \quad \forall k, t \quad (7)$$

La contrainte (7) est la même que la précédente, sauf que celle-ci ne concerne que les machines d'assemblage des produits semi-finis. Elle exprime la relation entre la charge et la capacité d'une machine d'assemblage k.

- **Contraintes de respect des mouvements de stock**

D'après les hypothèses émises, l'entreprise constitue des stocks de matières premières et des encours (produits semi-finis), il est donc primordial de poser des conditions sur le mouvement de ces derniers afin d'éviter les ruptures et livrer le produit au client à temps. Nous prenons également en considération la demande externe de produits semi-finis, dans le cas où l'entreprise vend des pièces détachées.

$$I_{j,(t-1)} + Q_{j,(t-L_j)} = (\alpha_{ij}\beta_i + \delta_j) * Q_t + \alpha_{ij} * D_{i,t} + I_{j,t} \quad \forall i, j, t \quad (8)$$

La contrainte (8) assure que la somme de stock de matière première à la fin de la période t-1 et la quantité de matière première approvisionnée à la période t est égale à la somme du besoin total en matière première à la période t et le stock de matière première à la fin de cette période.

$$I_{i,(t-1)} + Q_{i,(t-L_i)} = \beta_i * Q_t + D_{i,t} + I_{i,t} \quad \forall i, t \quad (9)$$

De même, la contrainte (9) traduit le mouvement des stocks dans le cas des produits semi-finis.

- **Contraintes de signe des variables**

$$I_{j,t}, I_{i,t}, O_{k,t}, U_{k,t} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (10)$$

La contrainte (10) indique que toutes les variables de décision sont positives ou nulles.

3.3 Optimisation du maillon « Transport »

Le transport est un maillon indispensable qui assure la liaison entre les différents maillons de la chaîne logistique, notamment la logistique avale. Au même titre que les opérations de production, les opérations de transport devront être optimisées parce que susceptibles d'induire des coûts considérables. En effet, même si ces coûts peuvent varier considérablement selon les produits et les destinations, on estime qu'en moyenne les coûts de transport représentent entre 5 et 10% de la valeur du produit fini livré (Savy, 2007).

On peut distinguer trois types de réseaux de distribution au niveau de la logistique avale (Baglin et al., 2007) :

- Livraison directe : la livraison du produit s'effectue directement de l'usine de production aux clients, il y a donc absence d'entrepôt de stockage (autre que celui de l'usine).
- Système à un étage : ce système se présente sous la forme de deux variantes : soit le produit est transporté aux entrepôts locaux avant d'arriver aux clients, soit il est transporté à un entrepôt central avant d'être livré aux clients.
- Système à deux étages : le produit est transporté à un entrepôt central, il est ensuite distribué aux entrepôts locaux avant d'être livré au client.

Nous adoptons un système de distribution à un étage où l'entreprise de production livre le produit à des entrepôts locaux de stockage avant de desservir les clients (Figure V.4).

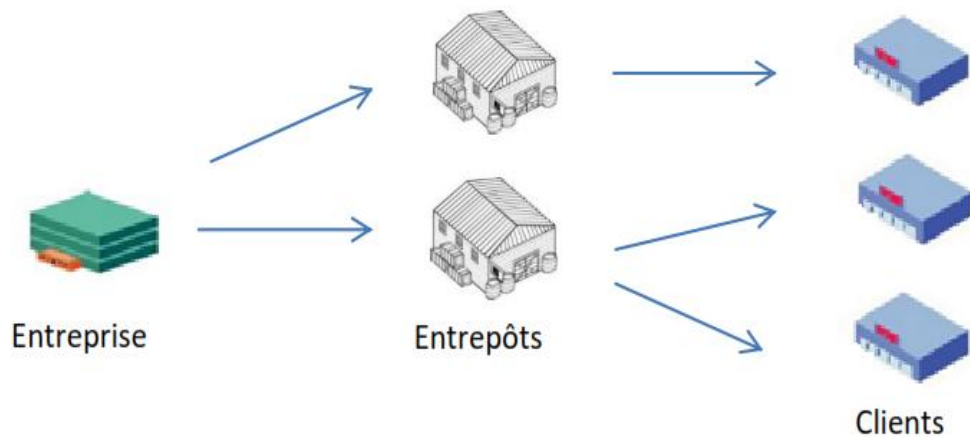


Figure IV.4 : Réseau de distribution adoptée

Notre problème consiste à minimiser essentiellement le coût de transport au niveau de la logistique avale (transport de l'entreprise aux entrepôts et des entrepôts aux clients), le transport en amont de la chaîne étant pris en considération dans l'optimisation du maillon « fournisseur ». Certes, la réalité du transport est multimodale mais nous nous limiterons au transport routier.

3.3.1. Indices

W : l'ensemble des entrepôts $w, w \in \{1 \dots W\}$

L : l'ensemble des clients $l, l \in \{1 \dots L\}$

M : l'ensemble des moyens de transport $m, m \in \{1 \dots M\}$

T : l'ensemble des périodes $t, t \in \{1 \dots T\}$

3.3.2. Paramètres du modèle

$CT_{w,m}$: coût unitaire de transport du produit de l'entreprise vers l'entrepôt w avec le moyen de transport m .

$CT'_{l,w,m}$: coût unitaire de transport du produit de l'entrepôt w au client l avec le transport m .

Cap_m : capacité de transport du moyen m entre l'entreprise et l'entrepôt w .

$Cap_{m'}$: capacité de transport du moyen m' entre l'entrepôt w et le client l .

$Quota_m$: pourcentage de la capacité du transport m dédié au produit étudié.

Q_t : quantité du produit produite à la période t

$D_{l,t}$: demande du produit exprimée par le client l à la période t

3.3.3. Variables de décision

X_{wtm} : Quantité de produit transportée de l'entreprise à l'entrepôt w par le moyen de transport m à la période t .

$Y_{wltm'}$: Quantité de produit transportée de l'entrepôt w au client l par le moyen de transport m' à la période t .

3.3.4. Fonction objectif de transport

La fonction objectif à minimiser est le coût de transport qui comprend le coût de transport entre l'entreprise et les entrepôts de stockage ainsi que celui entre les entrepôts et les clients.

$$\text{Min} \left(\sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M CT_{wtm} * X_{wtm} + \sum_{w=1}^W \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{m'=1}^{M'} CT'_{wltm'} * Y_{wltm'} \right) \quad (11)$$

3.3.5. Contraintes

- **Contraintes relatives à la capacité de transport**

$$X_{wtm} \leq Cap_m * Quota_m \quad \forall w, m, t \quad (12)$$

$$Y_{wltm'} \leq Cap_{m'} * Quota_{m'} \quad \forall w, l, m', t \quad (13)$$

$$X_{wtm}, Y_{wltm'} \geq 0 \quad \forall w, l, m, m', t \quad (14)$$

Les contraintes (12) et (13) impliquent que la quantité transportée ne dépasse pas la capacité du moyen de transport.

Notre modèle ne concerne qu'un seul type de produit mais nous sommes conscients qu'un moyen de transport peut transporter plusieurs produits. C'est pour cela que nous avons multiplié la capacité du transport par le quota réservé au produit étudié.

La contrainte (14) précise que les variables de décision sont positives ou nulles.

- **Contraintes relatives au respect de la demande**

$$Q_{(t-L)} = \sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M X_{wm(t-L')} \quad \forall t \quad (15)$$

$$D_{lt} = \sum_{w=1}^W \sum_{m'=1}^{M'} Y_{wltm'} \quad \forall l, t \quad (16)$$

On considère que le produit quitte l'entreprise à la période **(t-L)**, tel que L est le délai de livraison client. Le produit arrive à l'entrepôt à la période **(t-L')**, tel que (L' < L), pour être livré au client à la période **t** (Figure IV.5).

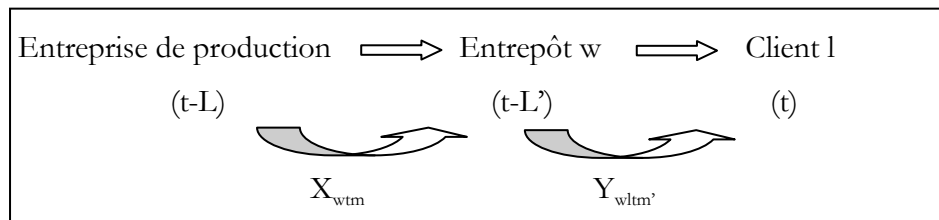


Figure IV.5 : Schéma illustrant les délais de livraison

La contrainte (15) indique que les quantités produites sont transportées aux entrepôts.

La contrainte (16) montre que les quantités demandées par le client l pour la période t sont satisfaites.

3.4 Optimisation du maillon « Entrepôt »

L'existence d'entrepôts de stockage dans le réseau de distribution se justifie par de nombreuses raisons telles que le besoin de se protéger contre les aléas (arrêts de fabrication), réduction du délai de livraison pour augmenter la satisfaction des clients, la fluctuation de la demande, etc. (Breuzard et Fromentin, 2004). Dans tous ces cas, la fonction de stockage représente un poste important dans le bilan de la chaîne logistique. Nous nous intéressons particulièrement au stock de produits finis ; le stock de matières premières et d'encours étant pris en charge par l'entreprise de production.

On retrouve dans ce maillon les opérations de manutention manuelle ou mécanique des produits vers les emplacements de stockage, le contrôle de qualitatif et quantitatif des produits, la vérification des conditions de stockage (poids, température ...), les inventaires des stocks,

etc. Nous regroupons l'ensemble des coûts relatifs à ces opérations dans le coût de stockage de l'entrepôt. Notre objectif consiste à minimiser ce coût.

Nous supposons que l'entreprise de production a déterminé au préalable le nombre approprié d'entrepôts et que la localisation de chaque entrepôt est choisie en fonction du client qu'il va approvisionner. Nous cherchons à déterminer le niveau de stock optimal dans chaque entrepôt.

3.4.1. Paramètres du modèle

CS_{wt} : Coût de stockage dans l'entrepôt w à la période t .

$Caps_w$: Capacité de stockage de l'entrepôt w .

$Quota_w$: Pourcentage de la capacité de l'entrepôt w dédié au produit étudié.

X_{wtm} : Quantité de produit transportée de l'entreprise à l'entrepôt w par le moyen de transport m à la période t .

$Y_{wtm'}$: Quantité de produit transportée de l'entrepôt w au client l par le moyen de transport m' à la période t .

3.4.2. Variable de décision

W_{wt} : Niveau de stock dans l'entrepôt w à la période t .

3.4.3. Fonction objectif de stockage

Le problème consiste à minimiser le coût de stockage dans les entrepôts

$$\text{Min} \left(\sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T CS_{wt} * W_{wt} \right) \quad (17)$$

3.4.4. Contraintes

- **Contrainte relative au respect de la capacité**

$$W_{wt} \leq Caps_w * Quota_w \quad \forall w, t \quad (18)$$

La contrainte (18) assure que la capacité de stockage de l'entrepôt w est respectée. Comme fait précédemment pour le maillon du transport, nous raisonnons en termes de quota réservé pour le

produit dans l'entrepôt w . Nous considérons qu'un entrepôt peut stocker plusieurs types de produits autres que celui étudié.

- **Contraintes relatives au niveau de stock**

$$W_{wt} = W_{w(t-1)} + \sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M X_{wtm} - \sum_{w=1}^W \sum_{l=1}^L \sum_{m'=1}^{M'} Y_{wltm'} \quad \forall t \quad (19)$$

$$W_{wt} \geq 0 \quad \forall w, t \quad (20)$$

La contrainte (19) détermine le niveau de stock du produit dans l'entrepôt w à la période t .

La contrainte (20) indique que la variable de décision W_{wt} est positive ou nulle.

Conclusion

Les modèles d'optimisation développés dans ce chapitre complètent la méthodologie basée sur le PLM pour la conception du produit et de sa chaîne logistique que nous avons proposée. Ces modèles permettent de prendre des décisions stratégiques et tactiques de conception de la chaîne logistique. Nous avons répondu principalement aux questions :

- Quels fournisseurs choisir ?
- Quelle est la quantité de matières premières nécessaire ?
- Quelles sont les quantités du produit fini à produire ?
- Quelles sont les heures supplémentaires/heures inemployées sur machine optimisant le coût de production ?
- Quel est le niveau de stock de matières premières et de produits semi-finis nécessaire en entreprise ?
- Quelle est la quantité optimale du produit fini à transporter ?
- Quelle est la quantité du produit fini à stocker ?

Nous avons opté pour une optimisation point par point qui permet, d'une part, de réduire la complexité des modèles mathématiques intégrées et d'autre part, de pouvoir répondre rapidement à l'évolution des conditions locales de chaque maillon de la chaîne logistique. L'échange des informations ou le regroupement centralisé des informations par le PLM à

travers la maquette numérique compense les résultats moins performants obtenus par une prise de décision locale.

Nous pouvons résoudre les modèles mathématiques à l'aide d'un solveur classique de programmation linéaire. Pour notre part, nous avons utilisé le logiciel ILOG Cplex version 12.2. Les programmes relatifs à chaque maillon de la chaîne logistique en langage OPL (*Optimization Programming Language*, langage de ILOG pour la description des modèles mathématiques) sont en annexe I.

Ces modèles seront lancés plusieurs fois pour boucler sur différentes alternatives de conception de produit.

Dans le chapitre qui suit, nous proposons un outil d'aide à la décision combinant modèle PLM et optimisation de la chaîne logistique. Nous validerons ensuite, la démarche proposée et les modèles mathématiques développés sur un cas d'étude industriel.

Chapitre 5 :
Outil d'aide à la décision
PLM/Optimisation de la chaîne logistique :
Modélisation de l'outil et Etude de cas

Introduction

Ce chapitre présente un outil d'aide à la décision qui répond à notre problématique de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique en adoptant l'approche PLM. Cet outil vise à informatiser la démarche décrite au chapitre 3 pour appuyer les décideurs en phase de conception de la chaîne logistique pour un nouveau produit.

Ce chapitre débute par une première section décrivant les spécifications et les fonctions escomptées de l'outil. Nous y présentons les diagrammes de cas d'utilisation et le diagramme de classes modélisant cet outil.

La deuxième section introduit un cas d'étude industriel afin d'illustrer l'applicabilité de la démarche. Il s'agit de la conception d'un nouvel emballage secondaire pour des produits laitiers. En effet, l'emballage secondaire est au cœur des opérations logistiques et a des conséquences sur la gestion des flux tout au long de la chaîne logistique.

Nous déroulerons les différentes étapes de la démarche depuis l'intégration des contraintes logistiques lors la conception du produit à la conception de sa chaîne logistique optimisée.

1. Outil d'aide à la décision PLM/Optimisation de la chaîne logistique

1.1. Spécifications fonctionnelles de l'outil

L'outil proposé permet d'assister les décideurs quant aux décisions relatives à la conception de la chaîne logistique en phase de développement du produit. Nous modélisons les caractéristiques attendues de l'outil en employant le formalisme UML qui permet la conceptualisation, la construction et la manipulation des données.

L'outil doit conserver l'approche PLM centrée sur le produit, il doit notamment permettre de :

- Dresser l'état des maillons, ainsi que leur nature ;
- Visualiser le produit, la chaîne logistique et faire appel aux résultats mathématiques d'optimisation ;
- Vérifier la pertinence de chaque décision (coût objectif respecté) ;
- Assurer une démarche itérative.

L'outil comprend essentiellement trois modules qui reprennent les principales étapes de méthodologie proposée dans les chapitres précédents (Figure V.1).

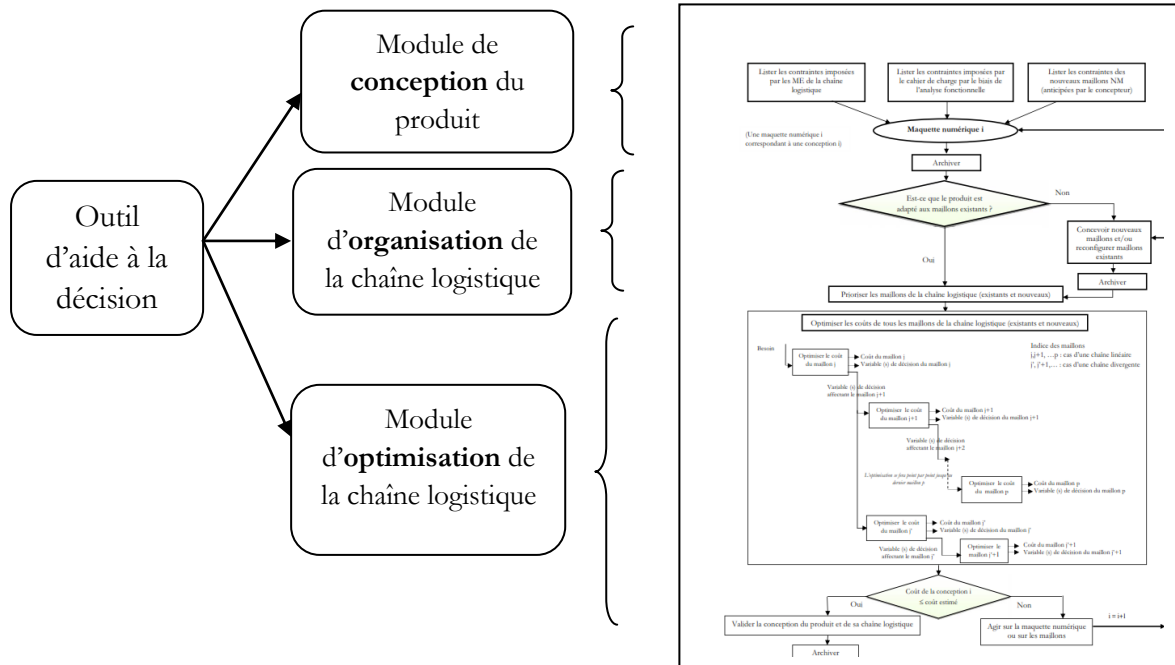


Figure V.1 : Les trois modules composant notre outil d'aide à la décision

-Module de conception du produit : Une interface doit être implémentée entre l'outil et un logiciel de CAO. Le concepteur importe un fichier CAO pour récupérer les données relatives à la maquette numérique (nomenclature du produit, caractéristiques des composants (physiques, géométriques...)).

- Module d'organisation de la chaîne logistique : Ce module permet de représenter les données relatives aux différents maillons de la chaîne logistique. Il comprend des champs relatifs à chaque maillon (fournisseur, entreprise de production, transport, entrepôt, client). Ce module permet d'ajouter ou de supprimer un maillon de la chaîne logistique. Il permet aussi de visualiser la succession des maillons.

-Module d'optimisation de la chaîne logistique : Ce module a un lien avec le logiciel d'optimisation Cplex, il permet de visualiser les différents résultats des modèles mathématiques

d'optimisation. Il permettra ainsi le calcul du coût du produit tout au long de sa chaîne logistique. Ce module génère les champs comprenant les résultats suivants :

- Fournisseur : Coût d'approvisionnement, quantité optimale à approvisionner.
- Entreprise de production : Coût de production, quantité optimale à produire, niveau de stock en matières premières et en produits semi-finis, nombre d'heures supplémentaires et inemployées.
- Transport : Coût de transport, quantité optimale à transporter (du site de production vers l'entrepôt et de l'entrepôt vers le client).
- Entrepôt : Coût de stockage, quantité optimale à stocker dans chaque entrepôt.

Le critère d'arrêt de la démarche d'optimisation sera le coût du produit le long de la chaîne logistique. Une vérification avec un coût objectif permettra de valider ou pas chaque conception.

Ce travail est effectué par le décideur ou le chef de projet (membre de l'entreprise pivot). Cette personne alimentera la base de données et devra pouvoir renseigner correctement les informations liées au produit et à la chaîne logistique.

1.2. Modélisation UML

1.2.1 : Diagrammes de cas d'utilisation

Le diagramme de cas d'utilisation relatif à la modélisation l'architecture produit décrit la procédure d'introduction de l'ensemble des composants du produit ainsi que leurs propriétés (Figure V.2).

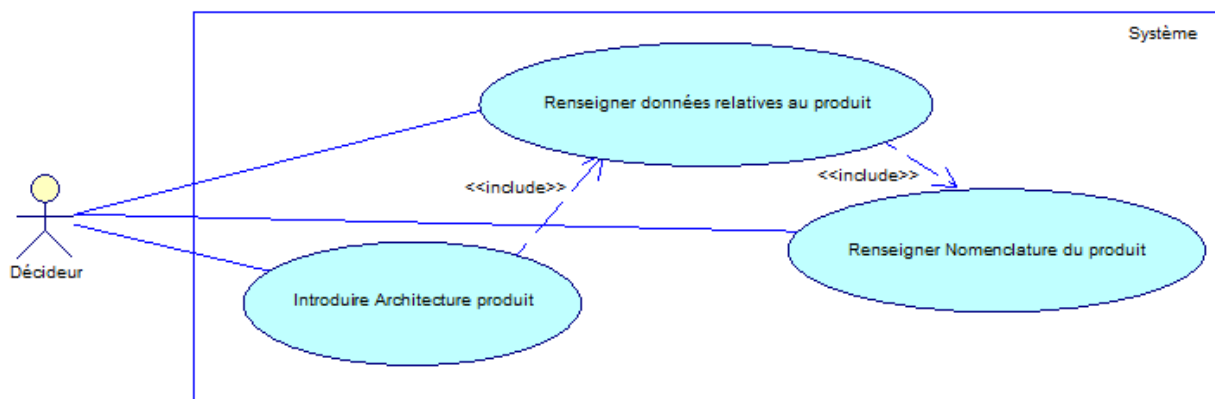


Figure V.2 : Diagramme Cas d'utilisation – Modélisation de l'architecture Produit

Lors de la phase de conception de la chaîne logistique, le décideur identifie les maillons existants de la chaîne ainsi que les nouveaux maillons à déterminer. Il définit le lien de succession des différents maillons ce qui permettra de spécifier l'ordre selon lequel se fera l'optimisation point par point de la chaîne logistique (Figure V.3).

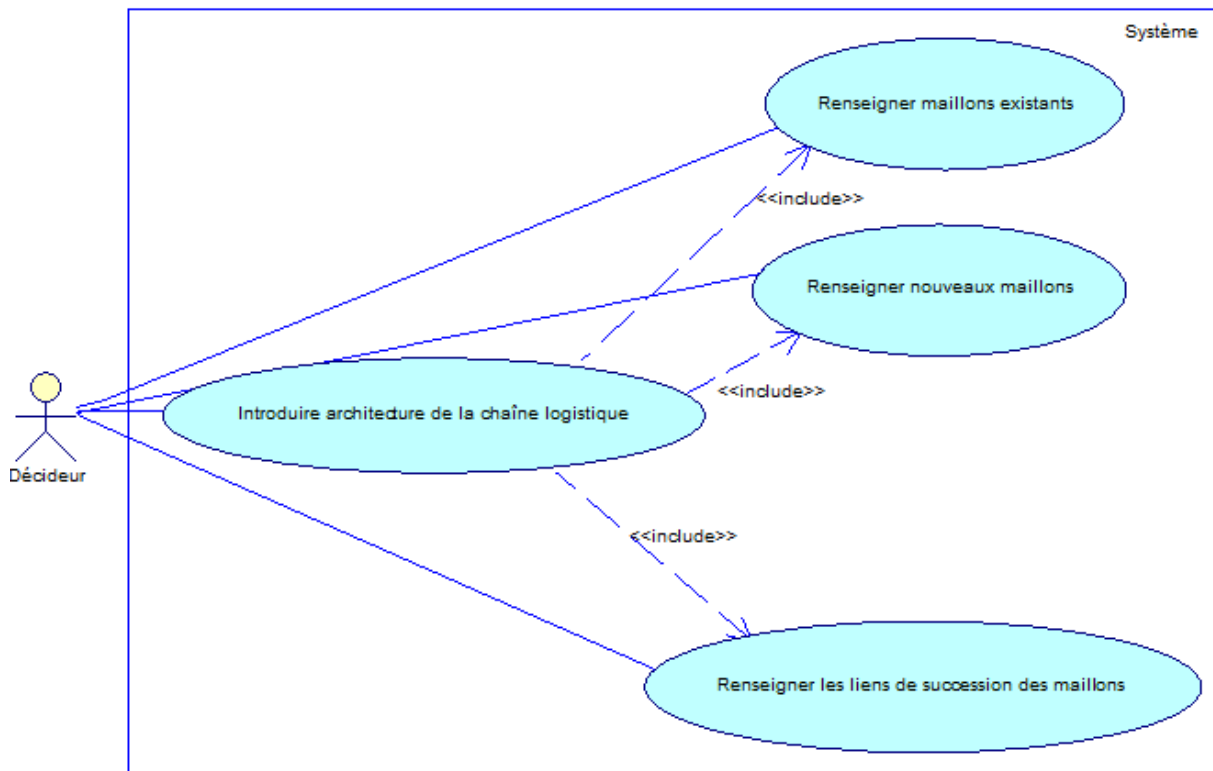


Figure V.3 : Diagramme cas d'utilisation – Modélisation de la structure de la chaîne logistique

L'optimisation du coût de chaque maillon de la chaîne logistique passe par l'introduction des données relatives à chaque maillon, nécessaires pour la résolution mathématique sur le logiciel Cplex.

Une fois les résultats de l'optimisation obtenus, le coût du produit tout au long de sa chaîne logistique est calculé puis comparé à un coût objectif de référence.

Finalement, le décideur valide la conception du couple produit/chaîne logistique ou alors décide soit de modifier quelques maillons de la chaîne logistique soit d'agir sur la conception du produit (maquette numérique) comme présenté dans la figure V.4.

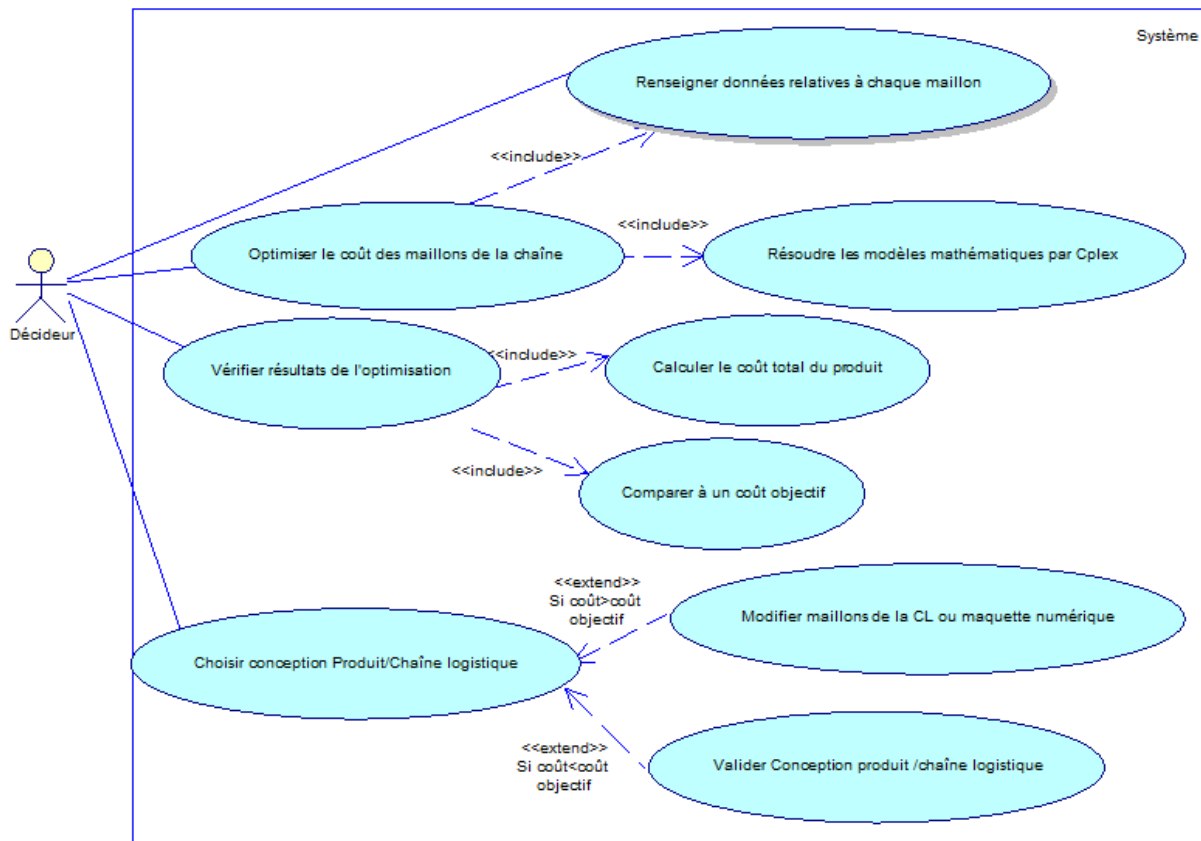


Figure V.4 : Diagramme cas d'utilisation –Optimisation de la chaîne logistique

1.2.2. Diagramme de classes

Le diagramme de classes de la figure V.5 permet d'identifier les entités qui composeront la base de données et les interactions qu'elles auront les unes avec les autres. Ce diagramme se base sur le modèle PLM que nous avons proposé en chapitre 2, il intègre les variables des modèles mathématiques d'optimisation relatives à chaque maillon de la chaîne logistique. Ces variables sont considérées comme attributs des différentes classes du diagramme

Ainsi, les éléments de base sont donc les informations sur le produit, sur les partenaires de la chaîne logistique et leurs dépendances.

Chapitre 5 : Outil d'aide à la décision PLM/Optimisation de la chaîne logistique
 Modélisation de l'outil et étude de cas

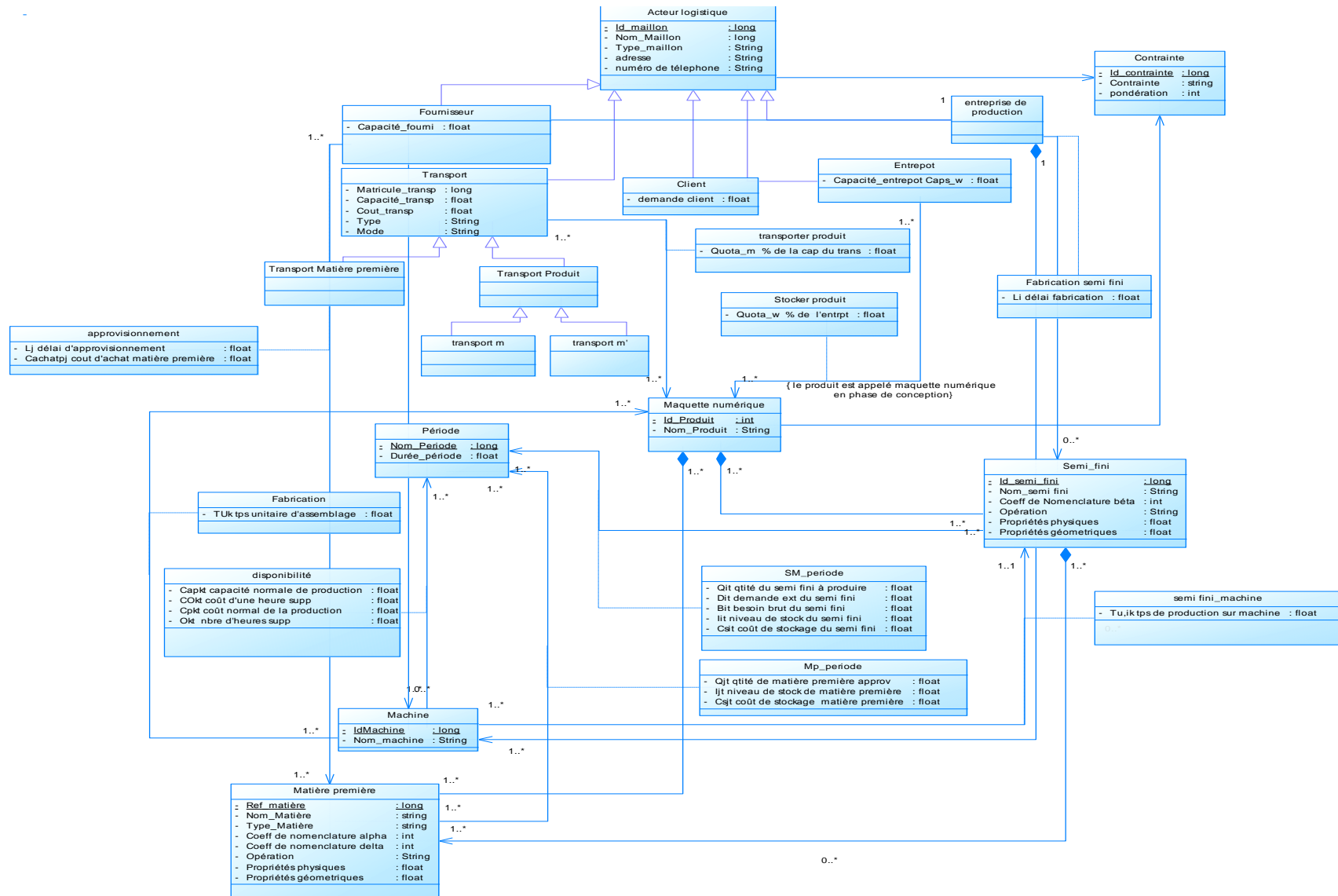


Figure V.5 : Diagramme de classes – Modèle PLM/Optimisation de la chaîne logistique

Le diagramme est centré sur le produit. Celui-ci est en phase de conception : maquette numérique. Elle se compose de matières premières et de produits semi-finis, cela est modélisé par la relation de composition entre la classe « Maquette numérique » et les classes « Matière Première » et « Semi-fini ». Chaque maillon de la chaîne logistique (Entreprise de production, Fournisseur, Transport, Entrepôt et Client) hérite de la classe mère « Acteur logistique » qui impose ses contraintes sur la maquette numérique.

Puisque les machines de production sont prises en compte dans le modèle mathématique de production, nous avons modélisé cette dépendance par une relation de composition entre les classes « Entreprise de production » et « Machine ». Ainsi, il existe des associations entre « Machine » et « Matière Première » pour les opérations de transformation et entre « Machine » et « Semi-fini » pour les opérations d'assemblage.

Concernant le transport, nous avons distingué entre le transport des matières premières et le transport du produit fini. Pour ce dernier, on différencie entre le transport amont de l'entreprise de production à l'entrepôt et le transport aval entre l'entrepôt et le client.

Nous avons eu recours à des classes d'association, caractérisées par un trait discontinu entre la classe et l'association qu'elle présente. En effet, l'utilisation des classes d'association se justifie par le fait que certaines propriétés n'appartiennent pas aux classes mais appartiennent à l'association qui les relie. Une classe-association se connecte à deux classes (binaire) ou plus (n-aire). Les classes d'association binaires ont été présentées dans le diagramme de classe (Figure V.4).

A titre d'exemple, nous explicitons la classe d'association « Semi fini_machine » (Figure V.6) :

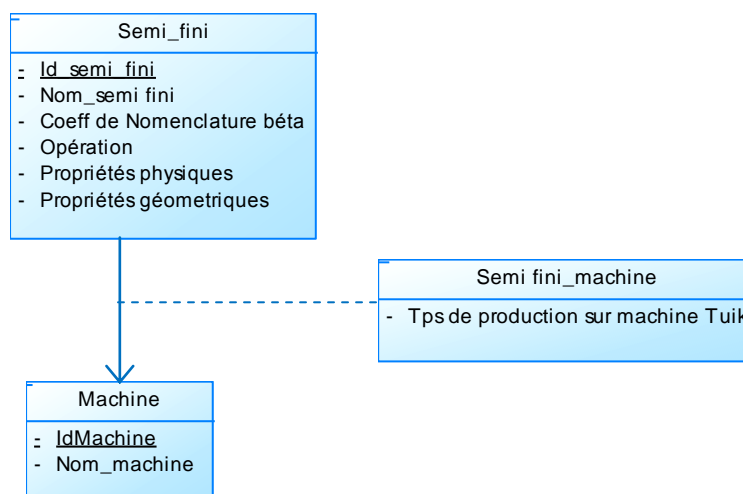


Figure V.6 : Classe d'association « Semi-fini_machine »

Le temps de production du semi-fini sur machine (TU_{ik}) dépend du produit semi-fini i et de la machine k . Ainsi, la classe d'association « Semi-fini_machine » relie les deux classes « Semi_fini » et « Machine »

Pour ne pas charger davantage le diagramme de classes de la figure V.5, nous n'y avons pas intégré les classes d'associations (n-aires), elles sont présentées dans les diagrammes suivants :

- **Classe d'association « Production »**

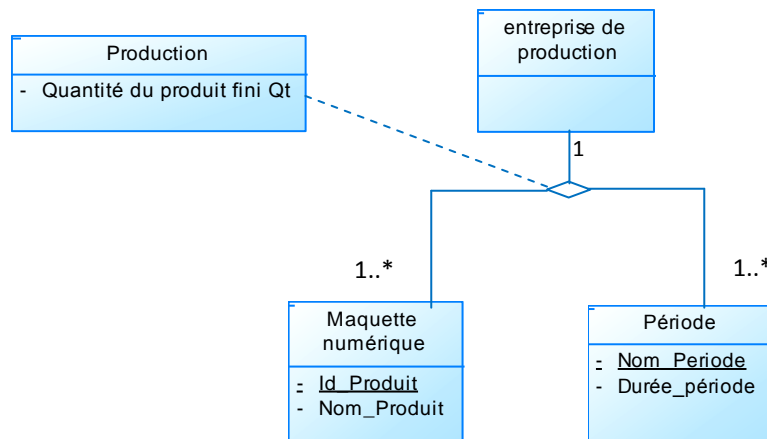


Figure V.7 : Classe d'association ternaire « Production »

La classe d'association « production » a comme propriété la quantité à produire du produit dans l'entreprise pendant la période t (Figure V.7).

En effet, la quantité Q_t n'appartient ni à l'entreprise de production qui peut fabriquer des quantités de produits divers, ni au produit qui peut être fabriqué en quantités différentes, ni à la période (la quantité à produire varie selon la période). Nous rappelons que le produit est désigné ici par maquette numérique car il est en phase de conception.

- **Classe d'association « Approvisionnement MP »**

Cette classe d'association (Figure V.8) associe les classes (fournisseur, matière première et période). En effet, la quantité à approvisionner en matières premières (Q_{pjt}), la quantité maximale du fournisseur (Q_{maxpj}) et le coût d'achat de matière première ($C_{achatpj}$) et le délai d'approvisionnement (L_j) dépendent de ces trois classes.

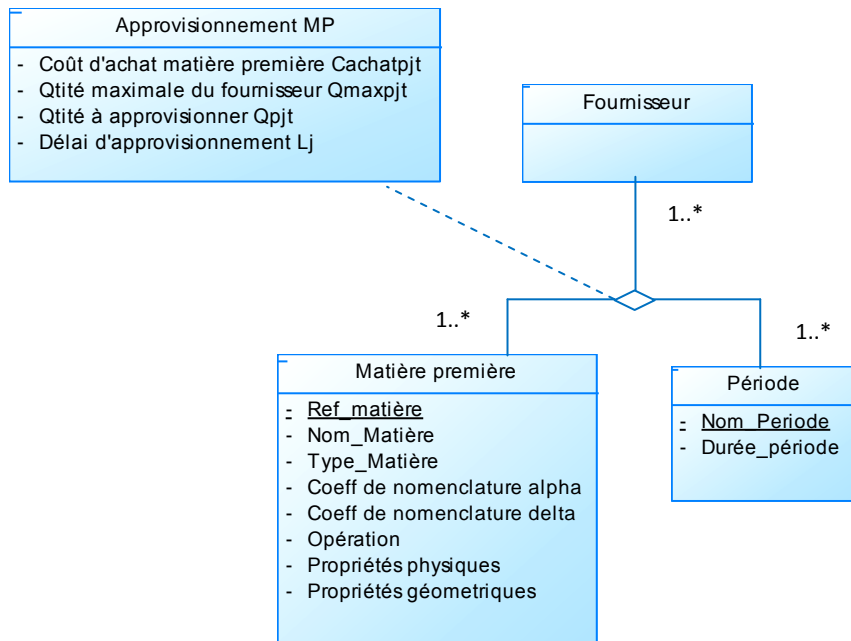


Figure V.8 : Classe d'association ternaire « Approvisionnement MP »

- **Classe d'association « Stockage Produit »**

Le quota du produit dans l'entrepôt, le niveau de stock du produit dans l'entrepôt (W_{wt}) et le coût de stockage dépendent du produit (la maquette numérique), de l'entrepôt et de la période (Figure V.9).

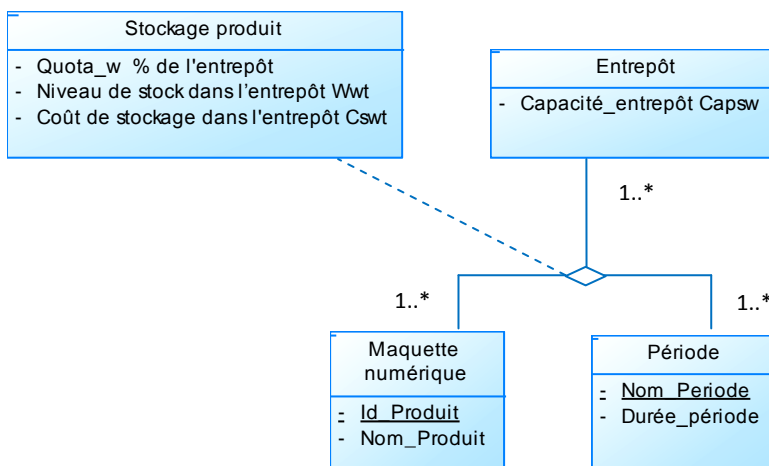


Figure V.9 : Classe d'association ternaire « Stockage Produit »

- **Classe d'association « Transport MP »**

La classe d'association « Transport MP » présentée dans la figure V.10, avec ses deux attributs : la quantité à s'approvisionner en matière première j du fournisseur p à la période t (Q_{pjt}) ainsi le

coût de transport de la matière première j du fournisseur p à la période t par le moyen de transport m (C_{transp_pmjt}), associe les quatre classes (Fournisseur, Matière Première, Moyen de Transport MP et Période).

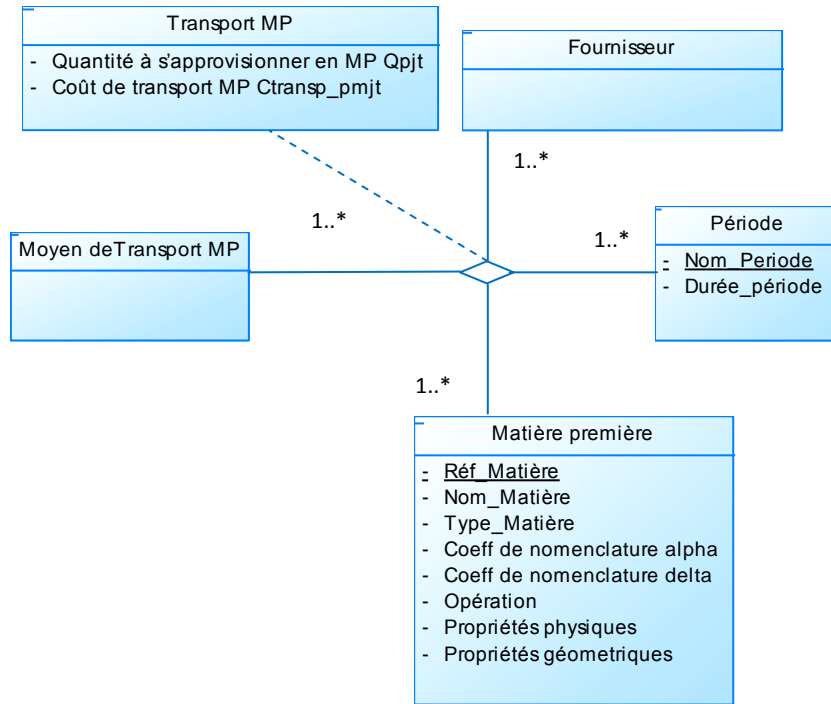


Figure V.10 : Classe d'association « Transport MP »

- **Classe d'association « Transport Produit_amont »**

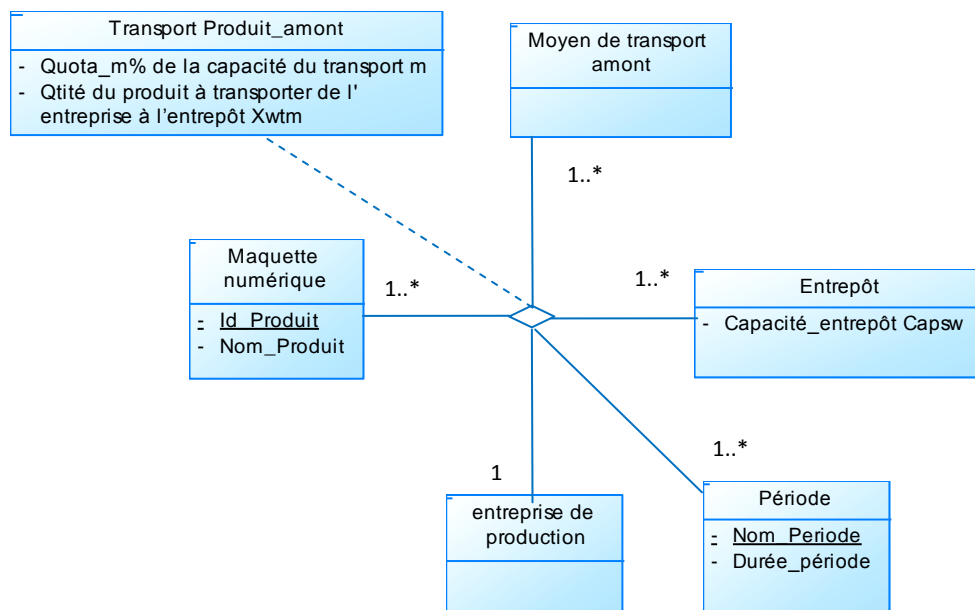


Figure V.11 : Classe d'association 5-aire « Transport Produit_amont »

La quantité du produit transportée de l'entreprise à l'entrepôt (X_{ntm}) et le pourcentage de la capacité du transport m dédié au produit étudié (quota_m% de la capacité de transport m) sont des propriétés de la classe d'association (Transport Produit_aval). Celle-ci relie cinq classes : maquette numérique, entreprise de production, entrepôt, moyen de transport amont et période (Figure V.11).

- **Classe d'association « Transport Produit_aval »**

De même, la classe (Transport Produit_aval) est une classe d'association 5-aire qui relie les classes : maquette numérique, entrepôt, client, moyen de transport aval et période (Figure V.12).

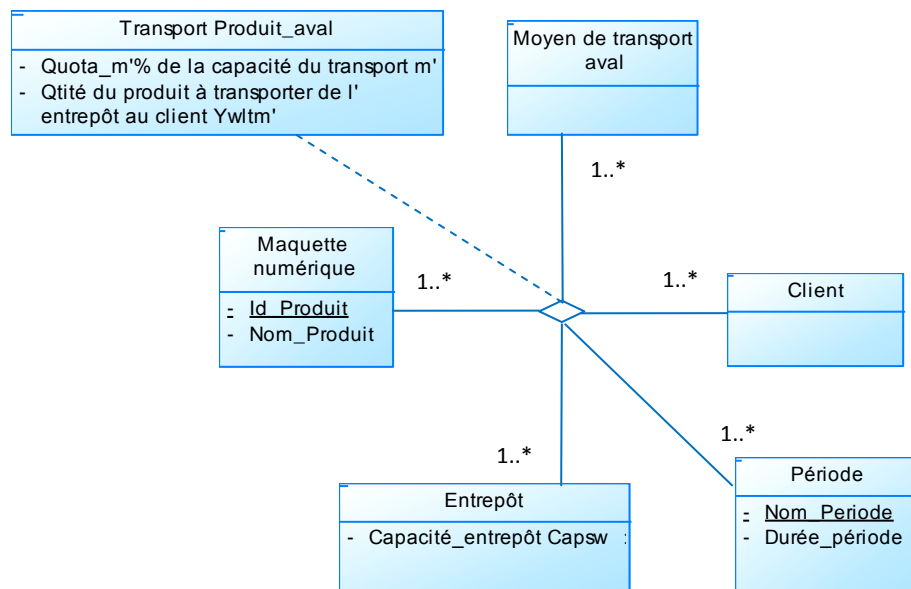


Figure V.12 : Classe d'association ternaire «Transport Produit_aval »

- **Classe d'association « Demande client »**

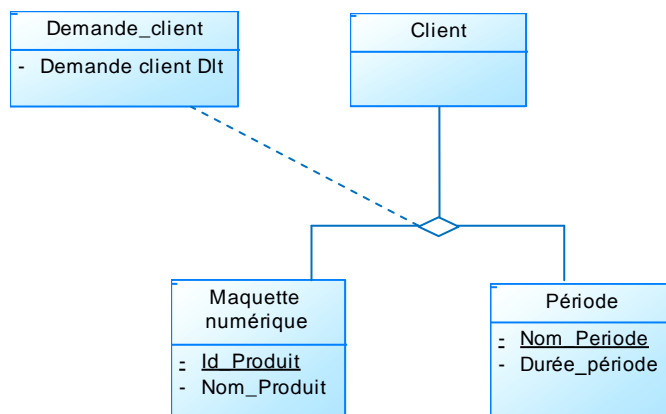


Figure V.13 : Classe d'association ternaire «Demande client »

La demande du client ($D(t)$) dépend du produit en question (ici maquette numérique), du client et de la période (Figure V.13).

Le diagramme de classes ainsi présenté avec les classes d'association qu'il contient met en évidence les interactions entre plusieurs facteurs fortement dépendants. Il intègre les paramètres de la maquette numérique ainsi que les variables relatives à l'optimisation de la chaîne logistique. Ces différentes interactions autour du produit reflètent la multitude des paramètres à gérer et la complexité des modèles mathématiques qui en résulte.

Cette complexité est traitée partie par partie par une optimisation point par point, l'interdépendance entre les maillons de la chaîne logistique et l'intégration de la maquette numérique étant assurée grâce à l'approche PLM adoptée.

2. Etude de cas : Emballage secondaire pour l'industrie de transformation laitière

2.1. Mise en situation

L'encaissage des produits laitiers dans des casiers en plastique comme emballage secondaire pose de plus en plus de problèmes industriels et logistiques pour l'entreprise (fabricant de produits laitiers). Parmi ces problèmes, nous pouvons citer :

- Logistique de récupération des casiers vides : tri des casiers retournés, lavage et désinfection des casiers conformes ;
- Logistique de circulation interne des casiers : encombrement, volume et poids ;
- Gestion des mouvements des casiers : stocks, expédition, encours, etc ;
- Problèmes de perte de casiers dans le circuit de distribution ;
- Recyclage des casiers déformés.

De plus, une étude financière a montré que chaque utilisation du casier plastique coûte 3,75 dirham marocain, ce coût englobe le coût d'achat, le taux de perte et de recyclage, et les coûts liés aux activités que subit le casier plastique tout au long de son cycle de vie : le lavage, la désinfection, le stockage et le transport.

Pour réduire les coûts relatifs à cet emballage et éliminer les problèmes contraignants de gestion des retours de casiers vides, le changement de ce type d'emballage est devenu une nécessité pour l'entreprise. Cette dernière a opté pour le remplacement de ces casiers en

plastique par des caisses en carton. Cela concerne dans un premier temps, la ligne de production de yaourts à forte valeur ajoutée (pot de 30g).

Une étude technico-économique a davantage justifié ce choix. En effet, une caisse en carton présente plusieurs avantages :

- Elimination des machines de lavage et de désinfection des casiers en plastique
- Circulation rapide à l'intérieur de l'entreprise.
- Elimination de la logistique de récupération des caisses vides.
- Economie sur les coûts de stockage des caisses en carton (gain de place pour le stockage du carton à plat).
- Economie sur les coûts de transport grâce à la légèreté du matériau et dimensions adaptables à celles du produit (pour le même volume actuel, on gagne le contenu d'une palette (nombre de pots pour trois palettes du casier plastique est le même qu'on peut mettre sur deux palettes en caisse de carton).
- Meilleure stabilité des pots de yaourts lors du transport (dimensions de la caisse en carton adaptées à celles du produit contrairement au casier plastique comme le montre la figure V.14 :



Figure V.14 : Intercalaire pour stabiliser les yaourts dans le casier plastique

Notre objectif est d'appliquer notre démarche basée sur le PLM pour la conception de la nouvelle caisse en carton ainsi sa chaîne logistique optimisée.

2.2. Cycle de vie de la caisse en carton

On considère le cycle de vie de la caisse en carton à partir de la réception du carton à plat des fournisseurs. Le carton est alors stocké dans une chambre sèche. Ensuite, il subit une opération de pliage pour former la caisse. Celle-ci est remplie de pots de yaourt (opération d'encaissage).

Les caisses ainsi remplies sont empilées sur des palettes pour être stockées dans des chambres froides avant d'être transportées vers des agences ou hubs de stockage. Enfin, elles sont distribuées chez les clients (Figure V.15).

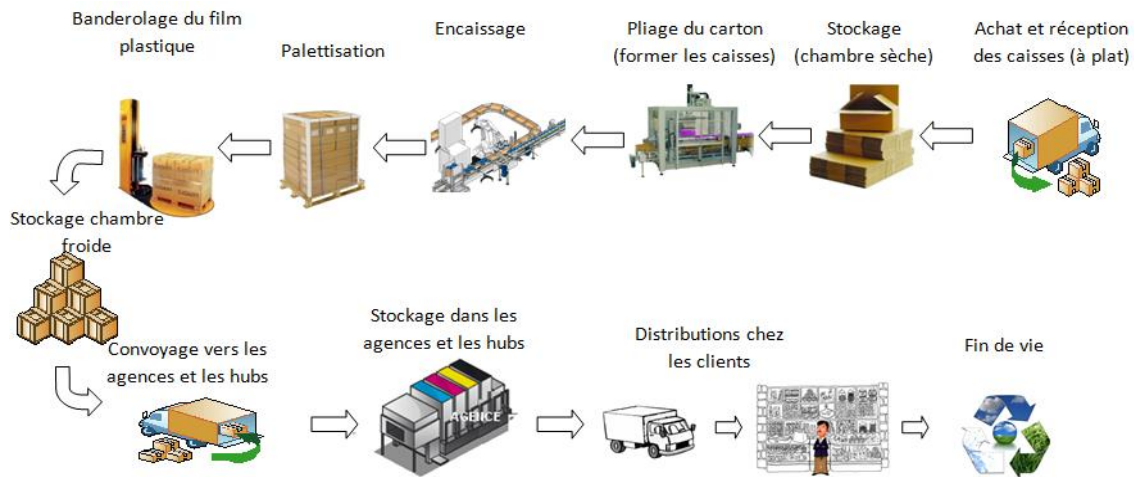


Figure V.15 : Cycle de vie de la caisse en carton

Nous décomposons le cycle de vie du produit en phases ou situations de vie. Chaque phase correspond au passage du produit par un maillon de la chaîne logistique.

Pour chaque phase, nous identifions les différentes fonctions de service du produit qui représentent les fonctions attendues par le produit pour répondre aux contraintes de chaque maillon. Cette étape sera détaillée ultérieurement (étape 2 de la section II.5).

2.3. Eléments du cahier de charge

- Contenir les pots de yaourts :
 - Le poids d'un pot de yaourt est de l'ordre de 33g, les dimensions du pot sont : 48x48x39 (mm) (Figure V.16).
 - La barquette se compose de 6 pots soit un poids de 198g, elle a des dimensions de 96x288x39 (mm).
 - L'unité de vente est estimée à peu près à 72 pots = 12 barquettes de 6 pots dont le poids est de $198 \times 12 = 2376g$.



Figure V.16 : Dimensions des pots de yaourts

- Résister aux contraintes mécaniques et climatiques

La caisse en carton va subir lors de son cycle de vie un certain nombre d'activités à savoir le stockage, le transport, les opérations de manutention (chargement, déchargement dans les semi-remorques). Elle doit ainsi :

- Résister à la compression verticale due au gerbage La caisse la plus critique est celle placée en bas de palette car elle va supporter le poids de 17 caisses, soit $17 \times 198 = 40,392 \text{Kg}$;
 - Résister aux chocs, aux secousses lors du transport ;
 - Résister aux opérations de manutention ;
 - Résister aux changements de température (passage de 4°C en chambre froide à 27°C en chambre sèche) ;
 - Résister à un taux d'humidité de 70 à 80%.
- Optimiser le volume disponible sur la palette

Les dimensions de la caisse sont choisies pour permettre une palettisation optimale en volume

- Hauteur maximale de la palette chargée de caisse en carton est d'environ 1600 mm.
 - Dimensions de la palette $L \times l \times h = 1200 \times 1000 \times 155 \text{ mm}$.
 - Le jeu fonctionnel doit être entre 2 et 4 mm
- Minimiser le volume inutilisé de l'emballage

Il faut concevoir la caisse de telle façon d'être adaptable à l'unité de vente en minimisant le volume inutilisé. Toutefois, il faut prévoir un jeu vertical de 5mm entre les pots et le haut de la caisse pour protéger le produit en cas de flambement ou écrasement partiel de la caisse.

- Permettre de constituer des charges palettisées stables

La stabilité peut être acquise, soit par le plan de palettisation ou l'unité de distribution elle-même (plateaux à oreilles par exemple), soit par des accessoires de palettisation (cornières, feuillard, colle de palettisation, intercalaires, etc.).

Les caisses avec oreilles pour assurer une stabilité lors du transport et pendant les mouvements de chargement et de déchargement des palettes.

- Faciliter les opérations de manutention (chargement et déchargement)

La caisse doit être facile à manipuler (une ouverture dans chaque côté gauche et droit afin de faciliter les opérations de manutention).

- Faciliter le stockage des emballages vides

Le volume occupé par le casier plastique vide est important ($L \times l \times h = 441 \times 307 \times 245$ (mm)) devant celui de la caisse en carton livré à plat ($L \times l \times h = 500 \times 500 \times 4$ (mm)).

Le volume de la caisse avant l'opération de pliage est négligeable (livrée à plat), donc on n'aura pas besoin d'un grand espace pour stocker les caisses vides. La seule contrainte est d'avoir un lieu sec pour leur stockage.

- Permettre les opérations de convoyage

La caisse conçue doit être adaptable aux convoyeurs existants en ce qui concerne les dimensions de la caisse, son poids, sa stabilité (essentiellement la stabilité des articles lors des passages sur les tapis de convoyage)

- Faciliter la préhension de l'emballage

Lors de l'acte d'achat et au cours de l'utilisation du produit, le consommateur doit avoir une bonne prise en main du produit, lui permettant d'effectuer tous les gestes usuels de façon ergonomique.

- Faciliter le contrôle à réception

Il s'agit de permettre un contrôle du contenu des palettes aussi bien en ce qui concerne les quantités que la nature du contenu et l'état des produits à l'arrivée. La forme de la caisse doit permettre un contrôle visuel rapide (quantitatif et qualitatif).

- Faciliter l'élimination par l'utilisateur

Afin de minimiser l'espace après utilisation, l'emballage doit pouvoir être déplié facilement (éviter un effet ressort lors de l'empilage de l'emballage utilisé).

- Respecter l'environnement

Il s'agit d'utiliser un matériau recyclable et biodégradable. L'emballage doit être mono-matériau ou composé de matériaux facilement séparables.

2.4. Application du modèle PLM au cas de la « caisse en carton »

On applique le modèle PLM sur la caisse en carton. Ce modèle PLM permet de formaliser toutes les informations relatives à la caisse de carton tout au long de son cycle de vie en intégrant les différents acteurs de la chaîne logistique pour les mettre à disposition du concepteur (Figure V.17).

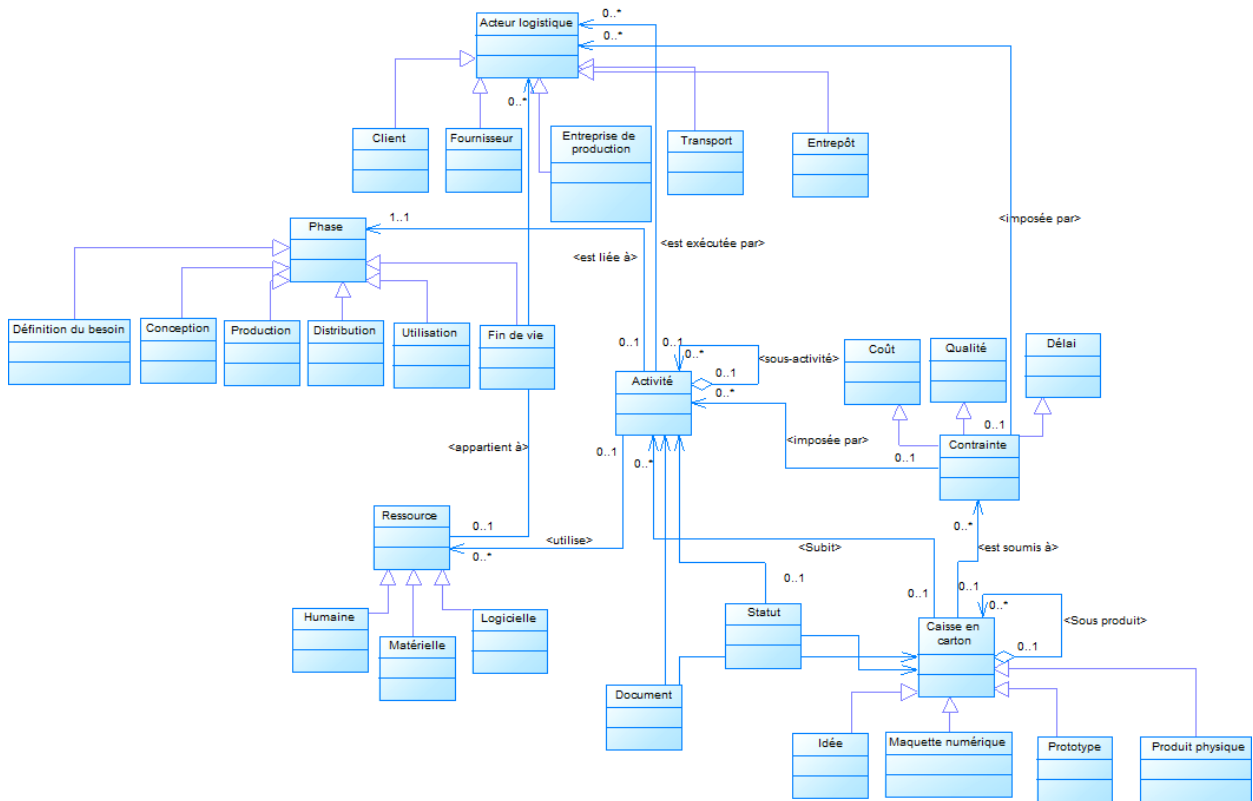


Figure V.17 : Modèle PLM_caisse en carton

Ce modèle est centré sur le produit « la caisse en carton ». Nous y trouvons les différents états de la caisse relatifs à chaque phase de son cycle de vie commençant par :

- « une idée », celle de remplacer le casier en plastique pour l'emballage secondaire des yaourts,
- Ensuite, « une maquette numérique » lors de la conception.
- Enfin, le « produit physique » qui englobe le prototype pour faire les tests nécessaires et valider les choix de conception puis, le produit fabriqué, stocké, transporté et utilisé.

La « caisse en carton » subit des « activités » comme : l'encaissage, le pliage, le stockage, le convoyage, etc.

Ces activités sont exécutées par un « acteur logistique » qui représente :

- l'entreprise de production (entreprise qui utilisera la nouvelle caisse pour l'encaissage des yaourts),
- le fournisseur (fabricant du carton à plat, le choix se fera entre plusieurs fournisseurs potentiels),
- l'entrepôt de stockage (chambre sèche pour le carton à plat, chambre froide pour la caisse remplie),
- le transport (essentiellement routier par semi-remorques et camions de tournées)
- le client (Grandes et Moyennes Surfaces GMS, points de vente traditionnels).

Chaque activité nécessite des « ressources » :

- matérielles (encartonneuse, encaisseuse, palette de stockage,...),
- humaines (personnel de production, personnel de manutention,...)
- logicielles (ici : ERP M3 pour la gestion des processus de l'entreprise, Catia pour la conception assistée par ordinateur, ...)

Chaque « activité » est relative à une « phase » de cycle de vie du produit. Dans notre cas, la caisse en carton passe par les phases de :

- conception de la caisse répondant aux critères industriels et logistiques.
- production qui comprend essentiellement les opérations de formage de la caisse et l'encaissage des yaourts.
- distribution avec les opérations de transport et de stockage de la caisse.
- utilisation qui concerne l'usage de la caisse en interne (dans le site de production) ou en externe (chez le client).

- fin de vie qui comprend l'élimination par le client et éventuellement le recyclage par une entreprise spécialisée.

Chaque « phase » de cycle de vie et chaque « acteur logistique » imposent des « contraintes » sur la caisse en carton :

- des contraintes relatives au coût (coût d'achat, coût de production, coût de transport, coût de stockage, ...);
- des contraintes de qualité (spécifications techniques répondant au cahier de charges);
- des contraintes de délai (délai de livraison, délai de fabrication, délai de stockage,...).

2.5. Application de la démarche de conception du produit et de sa chaîne logistique

Nous appliquons la démarche (Bouhaddou et al., 2013) explicitée dans les chapitres précédents:

2.5.1. Définition des maillons existants et des nouveaux maillons de la chaîne logistique

La plupart des maillons de la chaîne logistique du cas étudié existe déjà (Figure V.18). La conception de la caisse en carton doit s'adapter aux maillons existants : site de production, moyens de transport et entrepôts de stockage. Par contre, le maillon « fournisseur » reste à déterminer.

Même si le maillon « entreprise de production » est considéré comme maillon existant, il peut être reconfiguré en vue de s'adapter aux exigences du nouveau produit, par exemple, par l'achat de nouvelles machines.

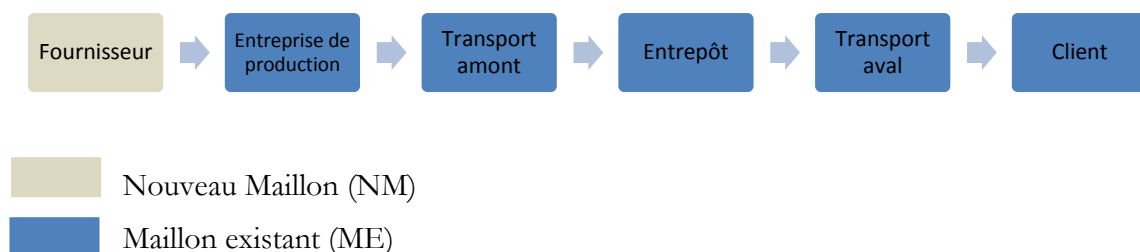


Figure V.18 : Maillons de la chaîne logistique étudiée

2.5.2. Détermination des contraintes imposées par les maillons existants et celles des nouveaux maillons (anticipées par le concepteur)

A partir du cahier de charges et du modèle PLM établi, on recense les fonctions attendues par le produit ainsi que les contraintes relatives à chaque maillon de la chaîne (Tableau V.I).

Tableau V.1 : Contraintes relatives à chaque maillon

Maillon	Contraintes
Maillon Fournisseur	<ul style="list-style-type: none"> - S'adapter à la capacité technique du fournisseur. - Optimiser la conception afin d'avoir un coût d'approvisionnement minimal. - Optimiser la conception afin d'avoir un délai de fabrication minimal. - Utiliser un matériau recyclable et biodégradable
Maillon « Entreprise de Production »	<ul style="list-style-type: none"> - Protéger l'unité de vente mécaniquement et thermiquement. - S'adapter aux convoyeurs de la ligne de production de yaourt - Adapter les capacités techniques des nouvelles machines (encaisseuse, plieuse) à la cadence des lignes de production - Faciliter les opérations de manutention - Faciliter la préhension de la caisse par les opérateurs (ergonomie de la caisse) - Minimiser le volume de stock du carton à plat (avant pliage) en entreprise - Avoir un coût minimal
Maillon « Transport »	<ul style="list-style-type: none"> - Résister aux charges extérieures lors du transport (secousses, chocs, compression dû au gerbage) - Résister aux conditions climatiques lors du transport (humidité, température) - Faciliter les opérations de manutention (chargement, déchargement) - Optimiser le volume pour s'adapter à la capacité du moyen de transport
Maillon « Entrepôt »	<ul style="list-style-type: none"> - Résister aux charges dues au stockage (compression verticale due au gerbage) - Résister aux conditions climatiques dans l'entrepôt (changement de température de 4°C à 27°C, taux d'humidité de 80%) - Optimiser le volume à stocker sur les palettes (palettisation optimale) - Permettre de constituer des charges palettisées stables en stockage - Faciliter les opérations de manutention
Maillon « Client »	<ul style="list-style-type: none"> - Faciliter le contrôle à réception (contrôle qualitatif et quantitatif) - Faciliter la préhension de l'emballage par le client - Faciliter la mise en rayon - Faciliter l'élimination de l'emballage par le client (dépliage de la caisse)

Le concepteur hiérarchise l'ensemble des contraintes selon leur ordre d'importance pour obtenir une conception de la caisse.

2.5.3. Conception de la caisse en carton

Plusieurs conceptions ont été étudiées : Le nouveau conditionnement consiste en la conception de la caisse en carton et le choix de l'unité de vente (nombre de yaourts que contient la caisse). En ce qui concerne le choix de l'unité de vente, le service commercial de l'entreprise a proposé trois solutions : 36 ou 54 ou 72 pots.

Avec un conditionnement de 36 pots, la caisse est petite (288*288*39 (mm)) donc difficilement stable lors de la palettisation. Ainsi, la contrainte de stockage qui consiste à constituer des charges palettisées stables n'est pas respectée.

Avec un conditionnement de 54 pots, il est nécessaire de casser la barquette de 6 pots pour pouvoir avoir deux étages empilés. Sinon, on aura une caisse à un seul étage de 9 barquettes de dimensions 432*288*39 (mm). La caisse consommera beaucoup d'espace lors du transport et de stockage et résistera moins au gerbage.

Ces deux solutions sont rejetées aux étapes initiales de notre démarche car on considère qu'elles ne tiennent pas compte des contraintes techniques et logistiques (stockage, transport).

La solution à 72 pots est retenue. Le choix sera davantage affiné par le calcul de coût.

Concernant le choix de la caisse, trois possibilités ont été étudiées :

- plateau à verrouillage manuel : le formage et l'encaissage est manuel,
- caisse pliée pré-collée (la caisse est approvisionnée pliée),
- plateau à verrouillage automatique (le formage et l'encaissage en mode automatique).

Chacune de ces possibilités pourrait donner lieu à plusieurs conceptions (changement de dimensions, changement de type de carton, changement de fournisseur...).

2.5.4. Conception de la chaîne logistique relative à la nouvelle caisse en carton

La conception du maillon « fournisseur » se fera en prenant en considération :

- Les contraintes de la maquette numérique (contraintes du produit)
- Les critères de sélection du fournisseur (critères qualitatifs et quantitatifs).

En effet, le choix des fournisseurs s'est basé essentiellement sur les critères de coût, de qualité, de délai de livraison et de capacité de production. Deux fournisseurs ont été retenus.

Le détail du calcul de la méthode AHP pour la sélection des fournisseurs n'a pas été jugé utile pour la compréhension de notre approche, nous l'avons délibérément omis.

Pour l'optimisation de la chaîne logistique, nous priorisons les maillons en suivant la logique du flux du produit (approvisionnement, production, transport et stockage).

Le produit étudié est la caisse remplie, nous avons adopté la nomenclature présentée dans la figure V.19 :

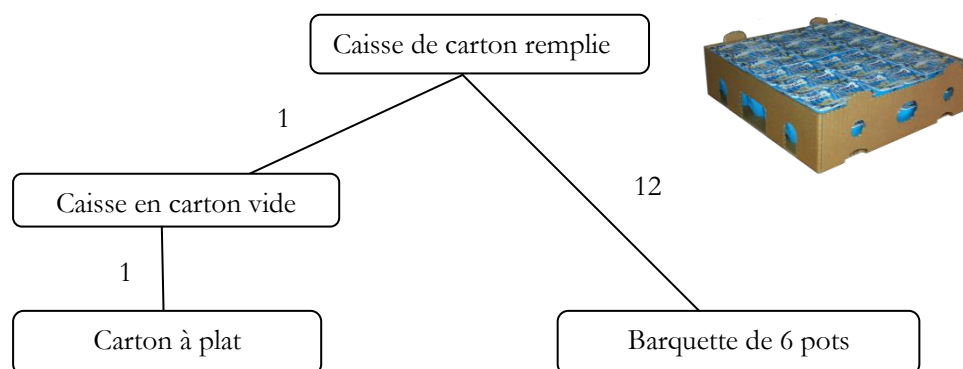


Figure V.19 : Nomenclature du produit étudié

La figure V.20 schématise la démarche adoptée pour ce cas d'étude.

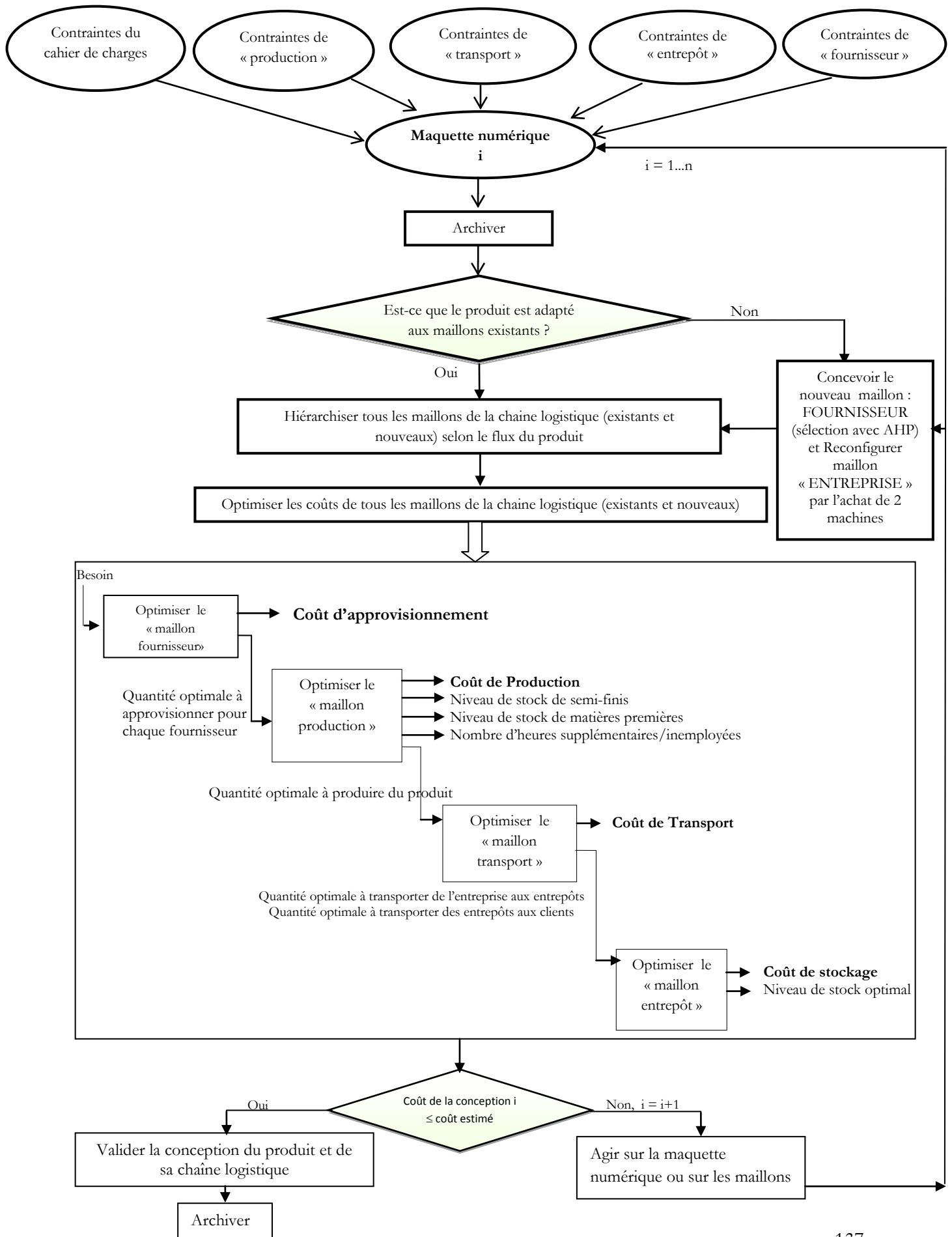


Figure V.20 : Démarche de conception produit/chaîne appliquée à l'étude de cas

Nous ne détaillons pas les différents résultats relatifs à l'optimisation, nous ne retenons que les coûts relatifs à chaque maillon.

Pour chaque conception, nous calculons le coût total du produit comme présenté dans le tableau V.2 :

Tableau V.2 : Coût de chaque conception (en dirham marocain)

Conception	Coût d'approvisionnement	Coût de production	Coût de transport	Coût de stockage	Coût du produit
Conception 1 (Fournisseur F1, plateau à verrouillage manuel)	1,80	0,16	0,14	0,98	3,08
Conception 2 (Fournisseur F2, plateau à verrouillage automatique)	1,59	0,23	0,14	0,98	2,94
Conception 3 (Fournisseur F1, caisse pliée pré-collée)	1,26	0,26	0,14	0,98	2,61
Conception 4 (Fournisseur F2, plateau à verrouillage manuel)	1,31	0,16	0,14	0,98	2,59
Conception 5 (Fournisseur F2, plateau à verrouillage automatique)	1,2	0,23	0,14	0,98	2,55

Le coût d'approvisionnement a été calculé en divisant la valeur de la fonction objectif correspondante à l'approvisionnement par la quantité optimale à approvisionner.

De même, le coût de production a été calculé en divisant la valeur de la fonction objectif de production par la quantité optimale à produire.

Le coût de production comprend le coût des opérations de formage et d'encaissage de la caisse ainsi que le coût de stockage des emballages vides.

Le coût de formage et d'encaissage manuel comprend essentiellement le coût de la main d'œuvre (3 opérateurs).

Le coût de formage et d'encaissage en mode automatique prend en compte l'amortissement annuel des nouvelles machines, le coût d'électricité, le coût d'air comprimé, le coût de la maintenance et le coût moyen de la main d'œuvre (un seul opérateur).

Concernant les coûts de transport et de stockage, à défaut d'avoir les données relatives à tous les moyens de transport (des centaines) et tous les entrepôts (une trentaine) ainsi que tous les clients desservis (des milliers), nous avons raisonné en terme de coût moyen.

Pour les conceptions 2 et 5, il s'agit du même fournisseur et du même mode de production mais les deux conceptions diffèrent de point de vue des propriétés géométriques et physiques.

Nous avons retenu le plateau à verrouillage automatique (Figure V.21). Le carton à plat sera approvisionné par le fournisseur F2.



Figure V.21 : Plateau à verrouillage automatique retenu

Les dimensions de la caisse (298* 298* 85) ont été choisies en tenant compte :

- de l'unité de vente (72 pots soit 12 barquettes de 6 sur deux étages) ;
- des dimensions de la palette (ce qui permet d'avoir une contenance de 15552 pots par palette soit 216 caisses et une efficacité de palettisation de 89,4%) (Figure V.22).

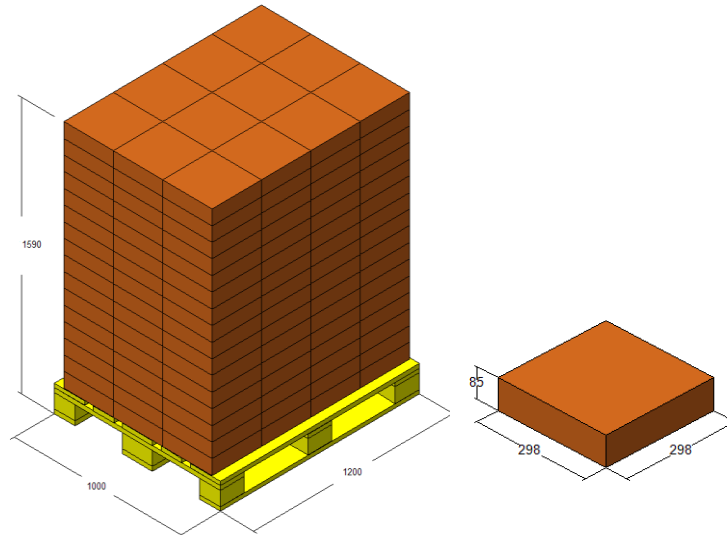


Figure V.22 : Palettisation des caisses

La caisse a été conçue en carton ondulé avec cannelure simple de type de C de 4 mm d'épaisseur présentant une résistance à la compression verticale de 210 KgForce, une résistance à l'éclatement de 800 KPa et une résistance à l'humidité de 20 à 30 g/m³.

Pour faciliter la manipulation/manutention des caisses, des ouvertures ont été prévues sur les côtés sous forme de poignées décortiquées (FEFCO, 2004).

Lors du stockage dans la chambre froide, il faut maintenir les produits laitiers à la bonne température. Pour ce faire, des ouvertures d'aération ont été prévues sur l'emballage. La caisse est ouverte (pas de rebords) pour faciliter l'opération d'encaissage.

Pour cette conception, nous calculons :

- les quantités optimales de carton à plat à s'approvisionner pendant les cinq périodes.
- les quantités à produire de caisses, les heures supplémentaires et les heures inemployées sur chaque machine ainsi que le niveau de stock de matière première (carton à plat) et de semi-finis (caisse formée) pendant les cinq périodes
- les quantités optimales de caisses remplies à stocker et à transporter (de l'entreprise de production aux entrepôts puis aux éventuels clients) pendant les cinq périodes.

Les résultats relatifs à l'optimisation de la chaîne logistique associée à cette conception sont présentés dans l'annexe II.

Conclusion

Ce chapitre a permis de modéliser l'outil d'aide à la décision basé sur l'approche PLM et de valider, ensuite, la démarche adoptée sur une étude de cas.

Nous avons présenté, dans un premier temps, les éléments relatifs à la modélisation de l'outil en langage UML. Les diagrammes de cas d'utilisation proposés avaient comme objectif d'appréhender les fonctions de point de vue de l'utilisateur. Le diagramme de classe a permis de décrire les différentes classes d'objets identifiées comme essentielles pour assurer une cohérence de l'outil.

Ce diagramme assure l'intégration des paramètres relatifs à la maquette numérique et les différentes variables nécessaires pour l'optimisation mathématique de la chaîne logistique.

Dans un deuxième temps, nous avons proposé un cas d'application industriel, il s'agit d'une entreprise dans le secteur agroalimentaire (produits laitiers) qui souhaite concevoir un nouvel emballage secondaire pour ses yaourts. Nous avons exploité le modèle PLM pour formaliser toutes les informations relatives au produit tout au long de son cycle de vie en intégrant les différents acteurs de la chaîne logistique. Ensuite, nous avons présenté progressivement les étapes de la démarche de la conception du produit à la conception de sa chaîne logistique optimisée.

Conclusion générale et Perspectives

Au cours de ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés à trouver une façon pertinente de lier la gestion de cycle de vie communément appelé PLM (*Product Lifecycle Management*) à l'optimisation des chaînes logistiques au sein d'entreprises manufacturières.

Cette thèse se positionne ainsi, aux intersections des domaines concernant le PLM, la logistique intégrée, l'ingénierie concourante et l'optimisation des chaînes logistiques.

Nous avons, tout d'abord, proposé un modèle PLM qui permet de formaliser les informations relatives au produit tout au long de son cycle de vie et en intégrant tous les partenaires de sa chaîne logistique.

Ce modèle met en évidence les différentes interactions entre le produit et sa chaîne logistique à travers toutes les phases de son cycle de vie. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la phase de conception. En effet, la conception est considérée comme une phase stratégique du cycle de vie du produit, c'est dans cette phase qu'est déterminée et décidée la grande majorité des caractéristiques du produit, ainsi que son processus de fabrication voire toute sa chaîne logistique.

Dans nos travaux, nous défendons l'idée que la structure de la chaîne logistique doit être définie au niveau de la conception du produit c'est-à-dire au niveau de la maquette numérique. Nous avons alors proposé une méthodologie basée sur l'approche PLM pour la conception du produit et de sa chaîne logistique optimisée.

Notre démarche prend en considération, dans un premier temps, les maillons de la chaîne qui existent déjà, leurs contraintes doivent être intégrées dans la maquette numérique. Dans un deuxième temps, se fait la conception de nouveaux maillons qui doivent satisfaire et la maquette numérique et le réseau logistique déjà existant.

Cette démarche combinant PLM et modèles mathématiques repose sur trois aspects : **organisationnel** par l'intégration de tous les acteurs de la chaîne logistique responsables des principales étapes du cycle de vie du produit, **technologique** en réunissant tous les acteurs autour de la maquette numérique, celle-ci conditionne et structure la conception de la chaîne logistique et **mathématique** par l'optimisation des coûts des maillons de la chaîne logistique.

Optimiser la chaîne logistique à partir de la maquette numérique nous met à cheval entre le réel (la représentation réelle du produit) et l'irréel (on est toujours dans la phase numérique).

Ainsi, si l'optimisation des chaînes logistiques est traitée dans la littérature comme une problématique purement mathématique, notre approche, quant à elle, se veut un carrefour entre science (modèles mathématiques) et technologie (maquette numérique, technologies de l'information et communication). Elle alterne modèles mathématiques, vérification avec la réalité et rectification sur la maquette numérique selon une méthode itérative.

Notre approche est d'une part centralisée dans la mesure où le PLM assure l'intégration de tous les partenaires de chaîne logistique et d'autre part, décentralisée dans la mesure où nous optimisons chaque maillon de la chaîne logistique

Ainsi, nous avons opté pour une optimisation point par point qui consiste en une suite d'optimisations locales des différents maillons de la chaîne logistique. La centralisation des décisions étant assurée par le PLM à travers la maquette numérique.

La combinaison du PLM et des modèles mathématiques nous évite, par conséquent, les modèles complexes associés au problème intégré de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique.

Nous avons utilisé la programmation linéaire pour modéliser les modèles d'optimisation. Nous avons optimisé successivement les coûts d'approvisionnement, de production, de transport et de stockage.

Concernant la conception du maillon fournisseur, nous avons opté pour une première sélection à l'aide de la méthode AHP, ensuite, une fonction objectif minimisant le coût d'approvisionnement.

Pour modéliser mathématiquement la maquette numérique, le modèle de la production prend en compte à la fois les composants qui constituent le produit (nomenclature) ainsi que la gamme de fabrication qu'il subit (opérations).

Les modèles de transport et de stockage minimisent respectivement les coûts de transport et les coûts de stockage.

Dans la dernière partie dans notre travail, nous avons rassemblé tout ce qui a été développé dans un outil d'aide à la décision. En effet, cet outil, se basant sur le modèle PLM proposé et respectant la démarche de conception du produit et de sa chaîne logistique, intègre les paramètres relatifs à la maquette numérique et les différentes variables nécessaires pour l'optimisation mathématique de la chaîne logistique.

Finalement, nous avons validé la démarche proposée ainsi que les modèles mathématiques développés sur un cas d'étude industriel. Certes, l'exemple étudié est simple mais c'est une façon pour nous d'assurer l'applicabilité de la démarche d'une part et d'autre part, de '*vulgariser*' le concept du PLM : Le PLM ne concerne plus que les produits complexes et appartenant aux grandes industries (aéronautique, automobile,..).

A défaut d'avoir des solutions PLM trop chères et inaccessibles, notamment pour les entreprises marocaines dont plus de 90% sont des PME (*Petites et Moyennes Entreprises*), nous voulons que l'approche PLM soit une culture d'entreprise à la portée de toute entreprise quelque soit sa taille et le degré de complexité de ses produits, une culture PLM basée sur la confiance, l'ouverture, la réutilisation des connaissances, la collaboration et l'innovation.

Ces travaux ouvrent des perspectives industrielles et scientifiques qui peuvent donner lieu à de futurs travaux de recherche :

- Concevoir simultanément le produit et sa chaîne logistique en utilisant l'approche PLM trouve des applications appropriées à la problématique de développement durable, nous proposons une prise en compte des impacts environnementaux dans la conception du produit et de sa chaîne logistique. L'optimisation simultanée de la fonction économique (coût) et de la fonction environnementale (empreinte carbone par exemple) paraît très pertinente dans ce cadre.

- Dans nos travaux, nous nous sommes focalisés sur la phase de conception, nous pouvons étendre notre étude sur tout le cycle de vie du produit. Nous pouvons particulièrement étudier le lien PLM/Optimisation de la chaîne logistique dans la phase de fin de vie. Dans ce sens, nous envisageons l'étude du PLM pour l'optimisation de la chaîne logistique inverse.

- Concernant la conception du maillon « fournisseur », à part les critères classiques de sélection des fournisseurs, nous pouvons ajouter, particulièrement pour des produits complexes contenant plusieurs composants, d'autres critères tels la compatibilité des fournisseurs dépendants et le degré d'intégrabilité à un réseau déjà existant. Nous pouvons ainsi imaginer la complexité et la combinatoire issues des différentes interactions.

Par ailleurs, nous nous sommes limités dans notre étude à déterminer le « maillon fournisseur », les autres maillons étant supposés déjà existants. Il serait alors intéressant d'étudier la conception des autres maillons tels que le choix du moyen et mode de transport, le choix des entrepôts...

Nous sommes conscients que chaque maillon a ses propres spécificités, d'ailleurs des travaux étudiant « *la culture des maillons* » sont en cours dans notre équipe.

- Enfin, nous proposons de développer l'outil d'aide à la décision en langage Java. Le logiciel d'optimisation Ilog Cplex fournit une interface de programmation (API, *Application Programming Interface*) pour les applications Java qui utilisent Cplex. En effet, notre outil sera basé sur l'API Java offerte par Cplex pour la résolution des modèles mathématiques d'optimisation.

Une fois l'outil d'aide à la décision basé sur le PLM informatisé, nous pourrions éventuellement étudier l'interopérabilité de ce système avec d'autres systèmes de l'entreprise

Références bibliographiques

A

- (Abbassen, 2007)** Abbassen S., De la modélisation produit dans les technologies XAO au PLM: une contribution à l'intégration des applications d'ingénierie dans un cadre de gestion du cycle de vie produit, Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007
- (Abramovici et Sieg, 2002)** Abramovici, M., et Sieg C., Status and development trends of Product Lifecycle Management. Product Data Management, Product Lifecycle Management, Product development Digital Engineering, *Engineering Collaboration*, 2002.
- (Agard et Penz, 2009)** Agard, B. et Penz, B., A simulated annealing method based on a clustering approach to determine bills of materials for a large product family, *International Journal of Production Economics*, Vol.117, No.2, pp 389-401, 2009.
- (Aguazzoul, 2005)** Aguezzoul, A, Prise en compte des politiques de transport dans le choix des fournisseurs. *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- (Akbalik, 2006)** Akbalik, A., Optimisation de la gestion intégrée des flux physiques dans une chaîne logistique : extensions du problème de dimensionnement de lot, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006
- (Alban et al., 1995)** Alban, D., Organisation du système d'information et stratégies d'entreprise étendue », *Thèse de Doctorat*, IAE de Paris – Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 1995.
- (Appelqvist et al., 2004)** Appelqvist P., Lehtonen J., Kokkenen J., Modelling in Product and supply chain design: literature survey and case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol.15, No.7, pp 675-686, 2004.
- (Arntzen et al., 1995)** Arntzen B.C., Brown G.G., Harrison T.P., Trafton L.L., Global supply chain management at digital equipment corporation, *Interfaces*, Vol. 25, No.1, pp 69–93, 1995.
- (Asiedu et Gu, 1998)** Asiedu Y., Gu P., Product Life Cycle analysis: state of the art review, *Int. Journal of Production Research*, Vol. 36, N. 4, pp.883-908, 1998.

B

- (Baboli et al., 2008)** Baboli, A., Pirayesh Neghab M.A., Haji R., An algorithm for the determination of the economic order quantity in a two-level supply chain with transportation costs: comparison of decentralized with centralized decision. *Journal of systems science and systems engineering*, vol.17, pp.353-366, 2008.
- (Baglin et al., 2007)** Baglin G., Bruel O., Garreau A., Greif M., Kerbache L., Van Delt C., *Management industriel et logistique*, Edition Economica, 2007.
- (Barrat et al., 2011)** Barratt, M., Barratt, R., Exploring internal and external supply chain linkages: evidence from the field, *Journal of Operations Management*, Vol.29, No.5, pp.514-528, 2011.
- (Barton et al., 2001)** Barton J.A., Love D.M., Taylor G.D., Design determines 70% of cost, a

review of implications for design evaluation, *Journal of Engineering Design*, Vol.12, No.1, pp.47-58, 2001.

(Baud-Lavigne, 2012) Baud-Lavigne B., Conception conjointe des nomenclatures et de la chaîne logistique pour une famille de produits : outils d'optimisation et analyse, *Thèse de Doctorat*, Université de Grenoble, 2012.

(Baud-Lavigne et al., 2012) Baud-Lavigne B., Agard B. et Penz B., Mutual impacts of product standardization and supply chain design, *International Journal of Production Economics*, Vol.135, No.1, pp.50-60, 2012.

(Baynat, 2000) Baynat B., Théorie des files d'attente : des chaînes de Markov aux réseaux à formes produit, Édition Hermès, 2000.

(Benabdelhafid, 1998) Benabdelhafid A., Système d'Information de Logistique Intégrée, Mémoire de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université du Havre, 1998.

(Benabdelhafid, 2000) Benabdelhafid A., "The information Technology in the logistics systems analysis and design", The Fifth International Conference on ISO 9000 & TQM, Singapoor, 2000.

(Benabdelhafid, 2001) Benabdelhafid A., Les NTIC et l'enseignement coopératif de la logistique, Deuxième rencontre des acteurs de la formation technologique d'Europe et d'Amérique latine, Guadeloupe, 2001.

(Benaissa, 2008) Benaissa M., Intégration de la supervision dans la chaîne logistique : application à l'entreprise manufacturière, *Thèse de Doctorat*, Université du Havre, 2008.

(Bendriss, 2009) Bendriss S., Contribution à l'analyse et la conception d'un système d'information pour la gestion de la traçabilité des marchandises dans un contexte de transport multimodal, *Thèse de Doctorat*, Université du Havre, 2009.

(Blauwens et al., 2006) Blauwens G., De Baere P., Van de Voorde E., Transport economics, De Boeck, Antwerpen, 2006. .

(Bollon, 2001) Bollon J. M., Étude de différentes politiques de pilotage de systèmes de production", *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

(Booch et al., 1999) Booch G., Rumbaugh J., et Jacobson I., Unified Modeling Language Users Guide , Addison Wesley Longman. 1999.

(Bouchriha, 2002) Bouchriha H., Faire ou Faire-faire dans la conception d'une chaîne logistique : outil d'aide à la décision, *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.

(Bouhaddou et al., 2012 a) Bouhaddou I., Benabdelhafid A., Ouzizi L., and Benghabrit Y., PLM for supply chain optimization, *9th International Conference on Product Lifecycle Management*, Montréal, Canada, 2012.

(Bouhaddou et al., 2012 b) Bouhaddou, I., Benabdelhafid, A., Ouzizi, L., and Benghabrit, Y. 'PLM for supply chain optimization', In *Product Lifecycle Management -Towards Knowledge*

Rich Enterprises, Rivest L., Bouras A. and Louhichi B. (Eds.), Vol. 338, pp.134-146, Springer, 2012 (ISBN 978-3-642-35757-2). (Article sélectionné suite à **(Bouhaddou et al., 2012 a)**).

(Bouhaddou et al., 2013) Bouhaddou I., Benabdelhafid A., Ouzizi L., Benghabrit Y., An optimized framework of integrated logistics based on PLM, *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transportation (ICALT)*, pp.438-443, Sousse, Tunisia, 2013.

(Bouhaddou et al., 2014) Bouhaddou I., Benabdelhafid A., Ouzizi L., Benghabrit Y., Product lifecycle management approach to design a product and its optimised supply chain', *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, Vol. 6, Nos. 3/4, pp.255-275, 2014.

(Bourland et al., 1996) Bourland K., Powell S., Pyke D., Exploiting timely demand information to reduce inventories, *European Journal of Operational Research*, 92, p.239-253, 1996.

(Browne et al., 1995) Browne J., Sackett P. J. et Wortmann, J. C., Future manufacturing systems-towards the extended enterprise, *Computers in Industry*, Vol. 25, No.3, pp.235-254, 1995.

C

(Camalot, 2000) Camalot J.P., Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources", *Thèse de Doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2000.

(Chen, 1996) Chen F., Echelon reorder points, installation reorder points, and the value of centralized demand information, Working paper, Columbia University, 1996.

(Chiang et Trappey, 2007) Chiang T.A., Trappey A.J.C., Development of value chain collaborative model for product lifecycle management and its LCD industry adoption. *International Journal of Product Economics*, Vol.109, No.1/2, pp.90-104, 2007.

(Christopher, 1992) Christopher M.L., *Logistics and Supply Chain Management*, Pitman Publishing, London, 1992.

(Christopher, 1998) Christopher M., Strategies for reducing costs and improving service, *Logistics and Supply chain management*, London : Prentice Hall, 1998.

(Chrisopher, 2000) Christopher, M., The Agile Supply Chain: Competing in Volatile Markets, *Industrial Marketing Management*, Vol.29, No.1, pp.37-44, 2000.

(Cimdata, 2003) CIMdata, *Product Lifecycle Management*, "Empowering the future of business", 2003.

(Cimdata, 2009) CIMdata, *PLM Market Growth in 2008*, Mid-Year, 2009.

(Clark et Wheelwright, 1993) Clark K.B., Wheelwright S.C., *Managing New Product and Process Development: Text and Cases*, Maxwell Macmillan International, New York, 1993.

(CNSS, 2006) Committee on National Security Systems, National Information Assurance Glossary, 2006.

(Cordeau et al., 2006) Cordeau J., Pasin F., Solomon M., An integrated model for logistics network design, *Annals of Operations Research*, Vol. 144, No.1, pp.59-82, 2006.

(Costa-Affonso, 2008) Costa-Affonso R., Proposition d'un cadre de modélisation pour la coordination d'entreprises dans la chaîne logistique, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.

(Cross, 1994) Cross, N., *Engineering design methods: strategies for product design*, Chichester: John Wiley and Sons, 2nd ed., 1994.

D

(Danesi et al., 2007) Danesi F., Gardan N., Gardan Y., Reimeringer M., P4LM : A methodology for product lifecycle management, *Computers in Industry*, Vol. 5, pp. 283-292, 2007.

(Daussalt Systèmes, 2013) <http://www.3ds.com/fr/plm-glossary/plm/>, page consultée en mars 2013.

(David, 1992) David R., *Du grafset au réseaux de Pétri*, Édition Hermès, 1992.

(Debaecker, 2004) Debaecker D., *La gestion collaborative du cycle de vie des produits- Product Life-cycle Management*, Hermès-Lavoisier, 2004.

(Debaecker, 2008) Debaecker D., *Product Life-cycle Management*, Vinci-consulting, 2008.

(De Boer et al., 2001) De Boer L, Labro E, Morlacchi P, *A review of methods supporting supplier selection*, *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol.7, pp.75-89, 2001

(Dejax, 2001) Dejax P., *Organisation et Implantation du Système Logistique et Gestion de la Distribution, La Maîtrise des Flux*, Éditions Hermès, 2001.

(Demoly, 2007) Demoly F., Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application de l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage, *Thèse de Doctorat*, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2007.

(Dickson, 1966) Dickson G.W, *An analysis of vendor selection systems and decisions*. *Journal of Purchasing*, Vol.2, No.1, pp.28-41,1966.

(Dionisi, 1995) Dionisi D., *L'essentiel de Merise*, Edition Eyrolles, Paris, 1995.

(Dowlatshahi, 1996) Dowlatshahi, S., The role of logistics in concurrent engineering. *International Journal of Production Economics*, Vol.44, No.3, pp.189-199, 1996.

(Dowlatshahi, 1999) Dowlatshahi, S., A modeling approach to logistics in concurrent engineering. *European Journal of Operational Research*, Vol.115, No.1, pp59-76, 1999.

(Dutta, 2005) Dutta D., *Sustaining product innovation through PLM*, International Seminar on Product Lifecycle Management, 18-19 mars 2005, Noida, India.

E

(El Maraghy et Mahmoudi, 2009) El Maraghy H., Mahmoudi N., Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. *International Journal of*

Computer Integrated Manufacturing, Vol.22, No.6, pp 438-493, 2009.

(Everhart, 1960) Everhart J.L., *Handbook of parts, forms, processes and materials in design engineering*, Van-Nostrand-Reinhold, New York, 1960.

(Eynard et al., 2004) Eynard B., Gallet T., Nowak P., Roucoules L., UML based specifications of PDM product structure and workflow, *Computers in Industry*, Vol.55, No.3, pp.301-316, 2004.

F

(Fathallah, 2011) Fathallah A., Modélisation d'entreprise : Proposition d'une démarche de construction et de validation de modèles réalisant la cohérence des systèmes de l'entreprise, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale Paris, 2011.

(Fathallah et al., 2008) Fathallah A., Stal Le Cardinal J., Ermine J-L., Bocquet J-C, Enterprise Modelling: Building a Product Lifecycle (PLM) Model as a component of the integrated vision of the enterprise, *International Conference on Integrated, Virtual and Interactive Engineering for fostering Industrial Innovation*, Beijing, China, 2008.

(Fawcett et Magnan, 2000) Fawcett S. E., Magnan, G. M., Supply Chain Management: Benefits, Barriers, and Bridges. The Third Worldwide Research Symposium on Purchasing and Supply Chain Management, London, Ontario, 2000.

(FEFCO, 2004) Guide la FEFCO : Fédération des fabricants de carton ondulé, code international pour emballage carton, 2004

(Fenies et Gourgand, 2004) Fenies P., Gourgand M., La mesure de la performance industrielle: application à la supply chain dans Lièvre P., Tchernev, N. (Eds.), *La logistique entre management et optimisation*, Paris : Hermès, pp.210-221, 2004.

(Ferber, 1995) Ferber J., Les systèmes multi-agents: vers une Intelligence collective, Inter-Edition, Paris, 1995.

(Fleischmann et al, 2000) Fleischmann B., Meyr H., Wagner M., Advanced Planning, *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Stadtler H., Kilger C. (Eds.), Springer-Verlag, 2000.

G

(Galasso, 2007) F. Galasso, *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

(Ganeshan et Harrison, 1995) Ganeshan R., Harrison T.P., An introduction to supply chain management, Working Paper. US : Department of Management Sciences and Information Systems, Penn State University, 1995.

(Ganeshan et al., 1998) Ganeshan R., Jack E., Magazine M.J. et Stephens P., A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research, in *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp 841-880, 1998.

(Gelembe, 1982) Gelembe E., *Introduction aux réseaux de files d'attente*, Collection techniques scientifiques des télécommunications, 1982.

(Génin, 2003) Génin P., Planification tactique robuste avec usage d'un A.P.S, proposition d'un mode de gestion par plan de référence. *Thèse de doctorat*, Ecole des Mines de Paris, 2003.

(GERAM, 1998) GERAM, Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology, IFIP-IFAC task force, Annex A to ISO 15704, ISO TC184/SC5/WG1 N423, 1998.

(GERAM, 1999) GERAM, Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology, Version 1.6.3, IFIP-IFAC Task Force, Mars 1999.

(Geryville, 2008) Geryville M.H., Une architecture d'échange et de partage d'information produit : transformation et adaptation des connaissances dans un contexte d'entreprise étendue, *Thèse de Doctorat*, Université Lumière Lyon 2, 2008.

(Chiang et Trappey, 2007) Chiang T.A., Trappey A.J.C., Development of value chain collaborative model for product lifecycle management and its LCD industry adoption, *International Journal of Products Economics*, Vol. 109, No.1/2, pp.90-104, 2007.

(Ghodsypour et O'Brien, 2001) Ghodsypour S. H., O'Brien C., The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. *International Journal of Production Economics*, Vol.73, pp.15-27, 2001.

(Giard, 2003) Giard, V., *Gestion de la production et des flux*, Economica, 3^{ème} édition, 2003.

(Gokhan, 2007) Gokhan N.M., Development of a simultaneous design for supply chain process for the optimization of the product design and supply chain configuration problem, *Phd thesis*, University of Pittsburgh, 2007.

(Greis et Kasarda, 1997) Greis N.P., Kasarda J.D., Enterprise Logistics in the information Era. *California Management Review*, Vol.39, No.3, pp 55-78, 1997.

(Grieves, 2006) Grieves, M., *Product Lifecycle Management : Driving the Next Generation of Lean Thinking*, Mc Graw-Hill, New york, 2006.

(Gruat La Forme, 2007) Gruat La Forme F.A., Référentiel d'évaluation de la performance d'une chaîne logistique - Application à une entreprise de l'ameublement, *Thèse de Doctorat*, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2007.

(Guesdon, 2011) Guesdon G., Aide multicritère à la décision, comparaison de Saaty, Cours de la Faculté des sciences et de génie, Université Laval, 2011.

(Gzara, 2000) Gzara L., Les patterns pour l'ingénierie des systèmes d'information produit, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.

H

(Hadj Hamou, 2002) Hadj Hamou K., Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes, *Thèse de doctorat*, Institut

National Polytechnique de Toulouse, 2002

(Handfield et Nichols, 1999) Handfield, R.B., Nichols, E.L., Introduction to Supply Chain Management, New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

(Harmon, 1992) Harmon R.L, Reinventing the factory II. The Free Press, 1992.

(Hatley et Pirbhai, 1987) Hatley D.J. Pirbhai I.A., Strategies for Real-Time System Specification, Dorset House Publishing Co., Inc., New York, 1987.

(Herstatt et Verworn, 2004) Herstatt C. et Verworn B., The « Fuzzy Front End » of Innovation. In : *Bringing Technology and Innovation into the Boardroom*, pp. 347–373, EITIM (Ed.), 2004.

(Ho et al., 2010) Ho W., Xu X., Dey P.K., Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review, *European Journal of Operational Research*, Vol.202, No.1, pp.16-24, 2010.

(Hong et Hayya, 1992) Hong, J. D., Hayya J.C., Just-In-Time purchasing: Single or multiple sourcing?, *International Journal of Production Economics*, Vol.27, pp.175-181, 1992.

(Huang, 1996) Huang Q., Design for X: concurrent engineering imperatives, Chapman & Hall Edition, 1996.

(Huang et Keskar, 2007) Huang S.H, Keskar H, Comprehensive and configurable metrics for supplier selection, *International Journal of Production Economics*, Vol.105, No.2, pp.510-523, 2007.

(Huhns, 1987) Huhns, M.N., Distributed artificial intelligence, Pitman Publishing, London, 1987.

I

(IDEF0, 1993) IDEF0, Integration Definition for Function Modeling (IDEF0), Federal Information Processing Standards Publication, 1993.

(ISO 10007, 2003) ISO 10007, Guidelines for Configuration Management, 2003.

J

(Jansen, 1990) Jansen P., Aide à la conception : Une approche basée sur la satisfaction de contraintes, *Thèse de doctorat*, Université de Montpellier, 1990.

(Jeantet, 1998) Jeantet A., Les objets intermédiaires dans la conception. Éléments pour une sociologie des processus de conception, dans *Sociologie du travail*, N°3, pp. 291-316, 1998.

(Jeantet et Boujut, 1998) Jeantet A., Boujut J.F., Approche socio-technique des processus de conception. In *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, pp. 115-138, Editions Hermès, 1998.

(Jolayemi et Olorunniwo, 2004) Jolayemi J.K., Olorunniwo F.O., A deterministic model for

planning production quantities in a multi-plant, multi-warehouse environment with extensible capacities, *International Journal of Production Economics*, Vol.87, pp. 99-113, 2004.

(Jun et al., 2007) Jun H.B., Kiritsis D., Xirouchakis P., Research Issues on closed loop PLM. *Computers in Industry*, Vol.58, No.8/9, pp.855-868, 2007.

K

(Katsikeas et al., 2004) Katsikeas C.S, Paparoidamis N.G, Katsikea E, Supply source selection criteria: the impact of supplier performance on distributor performance. *Industrial Marketing Management*, 2004.

(Kemp, 1999) Kemp, J.L.C., *Fractal organising of knowledge intensive organizations*, 1999.

(Kim, 2000) Kim B., *Coordination an innovation in supply chain management*, *Journal of Operational Research*, Vol.123, pp.568-584, 2000.

(Kim et al., 2003) Kim C.H., Weston R. H., Hodgson A., Lee K-H, The complementary use of IDEF and UML modeling approaches, *Computers in Industry*, Vol.50, No.1, 2003.

(Kiritsis et al., 2003) Kiritsis D., Bufardi A., Xirouchakis P., Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems. *Advanced Engineering Informatics*, Vol.17, No.3/4, pp.189-202, 2003.

(Koike, 2005) Koike T., Les interfaces pour l'intégration de la logistique dans les projets de conception- Une contribution basée sur le cas du projet d'un tracteur à chenilles, *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.

(Kok et Franso, 2003) Kok T.G., Fransoo J.C, Planning supply chain operations: definition and comparison of planning concepts, *Handbooks in operations research and management science*, Vol.11, pp.597-675, 2003.

(Kumar et al, 2004) Kumar, M., Vrat, P., Shankar R., A fuzzy goal programming approach for vendor selection problem in a supply chain, *Computers and industrial Engineering*, Vol.24, pp.69-85, 2004.

(Kuo et al., 2001) Kuo T-C., Huang S.H., Zhang H-C., Design for manufacture and design for X: concepts, applications, and perspectives, *Computers and Industrial Engineering*, Vol.41, No.3, pp.241-260, 2001.

(Kvan, 2000) Kvan, T., Collaborative Design: What is it?, *Automation in construction*, Vol.9, No.4, pp.409-415, 2000.

L

(Labrousse, 2004) Labrousse M., Proposition d'un Modèle Conceptuel Unifié pour la Gestion Dynamique des Connaissances d'entreprise, *Thèse de Doctorat*, École Centrale de Nantes, 2004.

(Lallement, 2004) Lallement P., Simulation des systèmes logistiques : exemple d'une chaîne logistique textile, Actes de la 5^{ème} Conférence francophone de modélisation et simulation (MOSIM04), Vol.2, pp.1123-1130, 2004.

(La Londe et Masters, 1994) La Londe B.J. et Masters J.M., Emerging Logistics Strategies: Blue-print for the next century, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol.24, No.7, pp.35-47, 1994.

(Lamothe et al., 2006) Lamothe J., Hadj Hamou K., Aldanondo M., An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. *European Journal Of Operational Research*, Vol.169, No.3, pp 1030-1047, 2006.

(Laurentie et al., 2006) Laurentie J., Berthelemy F., Gregoire L., Terrier C., Processus et méthodes logistiques : Supply chain management, AFNOR, 2006.

(Lee, 1996) Lee H.L., Effective inventory and service management through product and process redesign, *Operations Research*, Vol. 44, No. 1, pp.151-159, 1996.

(Lee, 2007) Lee C.H, Coordination on stocking and progressive pricing policies for a supply chain, *International Journal of Production Economics*, Vol.106, pp.307-319, 2007.

(Lee et Billington, 1992) Lee H.L., Billington C., Managing supply chain inventory: pitfalls an opportunity, *Sloan Management Review*, Vol.33, No.3, pp.65-73, 1992.

(Lee et Billington, 1993) Lee H.L., Billington C., Material management in decentralized supply chain, *Operations Research*, Vol. 41, No.5, pp. 835-847, 1993.

(Lee et Whang, 1998) Lee H.L., Whang S., Information Sharing in a Supply Chain, Research Paper, No. 1549, Graduate School of Business, Standford University, 1998.

(Le Duigou, 2010) Le Duigou J., Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue, Application aux PME mécaniciennes, *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Nantes, 2010.

(Lissandre, 1990) Lissandre M., *Maîtriser SADT*, Edition Colin, Paris, 1990.

(Louis-Sidney, 2011) Louis-Sidney L., Modèles et outils de capitalisation des connaissances en conception : Contribution au management et à l'ingénierie des connaissances chez Renault , *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Paris, 2011.

(Louis-Sidney et al., 2009) Louis-Sidney L., Cheutet V., Lamouri S., Discussion about the establishment of a support process for logistics of design. *3ième Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques (CMSM'2009)*, Hammamet, Tunisie, 2009.

(Lummus et Vokurka, 1999) Lummus R.R., Vokurka R.J., Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, Vol.99, No.1, pp. 11-17, 1999.

M

(Marin, 2009) Marin P., L'usage des systèmes d'information PLM contribue t-il à l'innovation collaborative ?, Thèse professionnelle de l'Exécutive Mastère Spécialisé Management des

systèmes d'information et des technologies, Mines Paristech, 2009.

(Malaval et Bénaroya, 2009) Malaval P., Bénaroya C., Marketing Business to Business, chapitre 13- Le management de produit, pp. 343 , Pearson , 4^{ème} édition, collection Eco gestion, 2009.

(Masella et Rangone, 2000) Mazella C., Rangone A., A contingent approach to the design of vendor selection systems for different types of cooperative customer / supplier relationships", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.20, No.1, pp.70-84, 2000.

(Mather, 1992) Mather H., Design for Logistics (DFL)- The next challenge for designers. *Production and Inventory Management Journal*, Vol.33, No.1, pp. 7-10, 1992.

(Matousek, 1957) Matousek R., Engineering Design - A Systematic Approach, The German edition by Springer-Verlag, Berlin: The English edition translated by A.H. Burton and Edited by D.C. Johnson, Published by Lackie & Son Ltd, London, 1957.

(Matthews et al., 2002) Matthews P.C., Blessing L.T.M., Wallace K.M., The introduction of a design heuristics extraction method, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.16, pp.3-19 2002.

(Maxwell et Van der Vost, 2003) Maxwell D., Van der Vorst R., Developing sustainable products and services, *Journal of Cleaner Production*, Vol.11, No.8, pp.883-895, 2003.

(Mc Kay et al., 2001) Mc Kay A., Pennington, A., Baxter, J., Requirements management: a representation scheme for product specifications, *Computer-Aided Design*, Vol.33, No.7, pp.511-520, 2001.

(Mentzer et al., 2001) Mentzer J.T, Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G., Defining the supply chain Management, *Journal of Business logistics*, Vol.22, No.2, 2001.

(Merzouk, 2007) Merzouk S, Problème de dimensionnement de lots et de livraisons : application au cas d'une chaîne logistique, *Thèse de doctorat*, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Franche-Comté, 2007.

(Messaadia , 2008) Messaadia M., Ingénierie système et système de production manufacturière : Intégration de l'évolution des exigences dans le PLM, *Thèse de Doctorat*, Université de Toulouse, 2008.

(Midler, 1993) Midler, C, L'auto qui n'existait pas. Management des projets et transformation de l'entreprise. Paris : InterEditions, 1993.

(Midler, 1997) Midler, C., Evolution des modèles d'organisation et régulations économiques de la conception. *Annales des Mines : les interfaces hommes-technologies*, 1997.

(Minneman, 1991) Minneman S.L., The social construction of a technical reality: empirical studies of group engineering design practices, *Pb.D. Thesis*, Dept. Of Mechanical Engineering, Stanford University, 1991.

(Mintzberg, 1982) Mintzberg H., Structure & Dynamique des Organisation, Les Editions d'Organisation, 1982.

(Müller, 2003) Müller M., The Use of Information Technologies in Supply Chains – A

Transaction Cost Analysis. In: Seuring, Müller, Goldbach and Schneidewind editors, *Strategy and Organization in Supply Chains*, Physica-Verlag, Heidelberg New York, 2003.

(Monsarrat, 2004) Monsarrat E., Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises dans le cadre de la production à la commande, *Thèse de Doctorat*, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2004.

(Monteiro, 2001) Monteiro T., Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises : le cas de la relation donneurs d'ordre-fournisseurs, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

(Molet, 2006) Molet H., *Systèmes de production et de logistique*, Hermès-science, Lavoisier, 2006.

(Mouloua, 2007) Mouloua Z., Ordonnements coopératifs pour les chaînes logistiques, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

(Murata, 1989) Murata T., Petri nets : properties, analysis and applications, *Proceeding of IEEE of Electrical Electronics Engineers, Inc.*, Vol.77, No. 4, 1989.

N

(New, 1997) New S.J., The scope of supply chain management research, *Supply chain Management*, Vol.2, No.1, pp. 15-22, 1997.

(Newlands et Steeple, 2000) Newlands, D. et Steeple, D., Logistics and Supply Chain development: part two - design of, and Design for Logistics. Control, June 2000.

(NF X 50-150, 1990) Analyse de la valeur- Analyse Fonctionnelle, Vocabulaire, Aout 1990.

(Niebel et Baldwin, 1957) Niebel B.W., Baldwin E.N., *Designing for Production*, Irwin, 1957.

(Nilsson et Fagerstrom, 2006) Nilsson P., Fagerstrom B., Managing stakeholder requirements in a product modeling system, *Computers in Industry*, Vol.57, pp.167-177, 2006.

(Nishigushi, 1994) Nishiguchi T., *Strategic Industrial Sourcing: The Japanese Advantage* Oxford University Press, New York, 1994.

(Nydick et Hill, 1992) Nydick, R. L., Hill R. P., Using the analytic hierarchy process to structure the supplier selection procedure, *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol.28, No.2, pp.31-36, 1992.

O

(Onkvisit, 1998) Onkvisit S., Shaw J.J., *Product Life Cycles and Product Management*, Quorum Books, Greenwood Press, Westport, Connecticut, 1998.

(Oracle, 2013) <http://www.oracle.com/global/fr/applications/agile/index.html>, page consultée en mars 2013.

(Ouzizi, 2005) Ouzizi L., Planification de la production par co-décision et négociation de l'entreprise virtuelle, *Thèse de doctorat*, Université de Metz, 2005.

P

- (Pahl et Beitz, 1996)** Pahl G., Beitz W., *Engineering design - A systematic approach*, 2nd edition, Springer-Verlag, Londres, 1996.
- (Paquet, 2007)** Paquet M., Optimisation de l'ingénierie de réseaux manufacturiers, *Thèse de doctorat*, Université Laval, 2007.
- (Paviot, 2010)** Paviot T., Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management, *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Paris, 2010.
- (Pech, 1973)** Pech H., *Designing for Manufacture*, Topics in Engineering Design series, Pitman & Sons Ltd, London, 1973
- (Pernelle, 2009)** Pernelle, P., Les principaux concepts des systèmes PLM, *Journée du PLM*, le 3 février 2009, Lyon.
- (Petri, 1962)** Petri K. A., Kommunikation mit automaten (communication with automata), *Thèse de doctorat*, Faculté de Darmstadt, Bonn, 1962.
- (Prasad, 1996)** Prasad B., *Concurrent Engineering Fundamentals: Integrated Product and Process Organization*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
- (Proth et Xie, 1995)** Proth J.M., Xie X., Les réseaux de Pétri pour la conception et la gestion des systèmes de production, Éditions Masson, 1995.
- (PTC, 2013)** <http://www.ptc.com/solutions/product-lifecyclemanagement/index.htm>, page consultée en mars 2013.

R

- (Rayaraman et al., 1999)** Rayaraman V., Srivastava R., Benton W. C., Supplier selection and order quantity allocation : a comprehensive model. *The Journal of Supply Chain Management*, pp.50-58, 1999.
- (Riane et al., 2011)** Riane I., Mousrij A., Riane F., Intégration de l'optimisation et de l'optimisation pour la conception des réseaux logistiques, *Conférence Internationale des Systèmes Industriels et Logistiques (SIL 2011)*, Casablanca, Maroc, 2011.
- (Ristic et al., 2011)** Ristic S., Skokovic M.R., Al-Dahoud A., An overview of the approaches for a PLM application's customization, *XV International Scientific Conference on Industrial Systems (IS'11)*, Novi Sad, Serbia, September 14-16, 2011.
- (Romano, 2003)** Romano P., Co-ordination and integration mechanisms to manage logistics processes across supply networks, *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol.9, No.3, pp.119-134, 2003.
- (Ross, 1977)** Ross D., Structured Analysis: A Language for Communicating Ideas, *IEEE Transactions on Software Engineering, Special Issue on Requirements Analysis*, Vol.3, No.1, 1977.

(Rota-Franz, 1998) Rota-Franz K., Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources. Application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique, *Thèse de doctorat de l'ENSAE*, 1998.

(Routroy, 2009) Routroy S., Evaluation of supply chain strategies: a case study, *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, Vol.1, No.4, pp.290-306, 2009.

(Roy et al., 2005) Roy R., Kerr C.I.V., Sackett P.J., Design requirements management using an ontological framework, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol.54, No.1, pp.109-112, 2005.

S

(Saaty, 1980) Saaty Th. L., *The Analytic Hierarchy Process*, Mac Gray-Hill, New York, 1980.

(Sahin et Powell, 2005) Sahin F., Powell R.E., Information sharing and coordination in make-to-order supply chains, *Journal of Operations Management*, Vol.23, No.6, pp.579-598, 2005.

(Sallaou, 2008) Sallaou M., Taxonomie des connaissances et exploitation en conception préliminaire, application à un système éolien, *Thèse de Doctorat*, ENSAM Paris Tech, 2008.

(Santarek et Buseif, 1998) Santarek K., Buseif I. M., Modelling and design of flexible manufacturing systems using SADT and Petri net tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.76, No.1, pp. 212-218, 1998.

(SAP, 2013) <http://www.sap.com/france/solutions/business-suite/plm/index.epx>, page consultée en mars 2013.

(Sarkar et Mohapatra, 2006) Sarkar A., Mohapatra P.K.J., Evaluation of supplier capability and performance: A method for supply base reduction. *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol.12, No.3, pp.148-163, 2006.

(Savy, 2007) Savy M., *Le transport des marchandises*, Eyrolles, 2007.

(Sbihi, 2004) Sbihi B., The filtering mechanism to the service of the UML, *Advanced Modeling and Optimization*, Vol.6, No.1, pp.75-86, 2004.

(Schuh et al., 2008) Schuh G., Rozenfeld H., Assmus D., Zancul E., Process oriented framework to support PLM implementation, *Computers in Industry*, Vol.59, No.2/3, pp. 210-218, 2008.

(SCOR, 2005) Supply chain operations reference Model: Overview version 7.0, Supply-Chain Council. 2005.

(Shelton et Medina, 2010) Shelton J., Medina M., Integrated Multiple-Criteria Decision-Making Method to Prioritize Transportation Projects, *Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2174, No.1, pp.51-57, 2010.

(Siemens, 2013) http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/plm/definition/, page consultée en mars 2013.

(Silva, 1996) Silva M., Petri net for design and operation of manufacturing system, *17th International Conference on application and theory of Petri Nets – Manufacturing and Petri Nets*, Osaka, Japon, 1996.

(Silva et Van Houten, 2003) Silva R.J., Van Houten F.J.A.M., Design for Logistics – towards integrated design decision support and product variety, *Proceedings of the CIRP Design Seminar*, Grenoble, May 12-14, 2003.

(Simchi-Levi et al., 2003) Simchi-Levi D., Kaminsky P., Simchi-Levi E., Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies, McGrawHill, Irwin, 2003.

(Simon, 1996) Simon H.A., The Sciences of the Artificial, Cambridge : MIT Press, 3th Ed, 1996.

(Sohlenius, 1992) Sohlenius G., Concurrent Engineering, *Annals of the CIRP*, Vol.41, No.2, 1992.

(Sperandio, 2005) Sperandio S., Usage de la modélisation multi-vue d'entreprise pour la conduite des systèmes de production, *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux 1, 2005.

(Stadtler, 2005) Stadtler, H., Supply chain management and advanced planning: basics, and challenges, *European Journal of Operational Research*, Vol.163, No.3, pp.575-588, 2005.

(Stadtler et Kilger, 2000) Stadtler H., Kilger C., Supply Chain Management and Advance Planning: concepts, models, software and case studies, Editions Springer Verlag, 2000.

(Stark , 2004) Stark J., Product Lifecycle Management – Paradigm for 21st century, Springer-Verlag, Berlin, 2004.

(STEP, 1995) ISO10303 (STEP: STandard for the Exchange of Product), SSID-STEP/SC4 Industrial Data Framework, 1995

(Sudarsan et al., 2005) Sudarsan R., Fenves S.J, Sriram R.D, Wang F., Product Information modeling framework of Product lefecycle Management, *Computer-Aided Design*, Vol.37, No.13, pp. 1399-1411, 2005.

(Supply Chain council, 1996) Supply Chain Council <http://www.supplychain.org>, 1996.

(SCOR, 2005) Supply chain operations reference Model: Overview version 7.0, Supply-Chain Council. 2005.

(Swaminathan et Tayur, 2003) Swaminathan J.M., Tayur S.R. Models for Supply Chains in e-Business. *Management Science*, Vol.49, No.10, pp. 1387-1406, 2003.

T

(Tang et al., 2004) Tang D., Eversheim W., Schuh G., A new generation of cooperative development paradigm in the tool and die making branch: strategy and technology, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol.20, No.4, pp.301-311, 2004.

(Taratynava, 2009) Taratynava, N, Modélisation par la théorie des jeux des échanges de prévisions dans un réseau d'entreprises, *Thèse de doctorat*, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2009.

(Tardieu et al., 1991) Tardieu H., Rochfeld A., Colletti R., *La méthode Merise, Tome 1 : Principes et outils*, Éditions d'organisation, Paris, 1991.

(Tayur et al., 1999) Tayur S., Ganeshan R., Magazine M., *Quantitative models for supply chain management*, Kluwer Academic Publishers, 1999.

(Terzi, 2005) Terzi, S., Gestion du cycle de vie des produits : Définitions, Problèmes ouverts et Modèles de référence, *Thèse de Doctorat*, Université de Nancy I, 2005.

(Tranier, 2007) Tranier J., Vers une vision intégrale des systèmes multi-agents - Contribution à l'intégration des concepts d'agent, d'environnement, d'organisation et d'institution, *Thèse de Doctorat*, Université de Montpellier II, 2007.

(Tsuchiya, 1993) Tsuchiya, S., Improving knowledge creation ability through organizational learning. In *Proceedings of International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge ISMICK'93*, Compiègne, France, 1993.

V

(Van der Vorst et al., 2001) Van der Vorst J., Beulens A., Van Beek P., Modelling and simulating multi-echelon food systems, *European Journal of Operational research*, Vol.122, pp.354-366, 2001.

(Van Moll, 2002) Van Moll J.H., The importance of Life Cycle Modelling to the development and testing of complex products, Philips semiconductors, Presentation at TestNet Najaarsevenement, Nieuwegein, 2002.

(Verganti, 1999) Verganti, R., Planned Flexibility: linking anticipation and reaction in product development projects, *Journal of Production Innovation Management*, Vol.16, No.4, pp.363-376, 1999.

(Vernadat, 1996) Vernadat F., *Enterprise modeling and integration: principles and applications*, Chapman & All, London, 1996.

(Vernadat, 1998) Vernadat F., The CIMOSA Language, in P. Bernus, K. Mertins and G. Schmidt, *Handbook on Architectures of Information Systems*, Springer-Verlag, pp. 243-264, 1998.

(Vernadat, 1999) Vernadat F., Techniques de modélisation en entreprise : application aux processus opérationnels, Editions Economica, 1999.

(Vernadat, 2001) Vernadat F., UEML : Towards a Unified Enterprise Modelling Language, *Actes de la 3ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'01)*, Troyes, France, 25-27 avril, 2001.

(Verma et Pullma, 1998) Verma R, Pullma M. E., An analysis of the supplier selection process, *International Journal of Management Science*, Vol.26, No.6, pp.739-750, 1998.

(Verschoor et Reijnders, 1999) Verschoor A.H., Reijnders L., The use of life cycle methods by seven major companies, *Journal of Cleaner Production*, Vol.7, No.5, pp.375-382, 1999.

(Vidal et Goetschalckx, 2001) Vidal C.J., Goetschalckx M., A global supply chain model with

transfer pricing and transportation cost allocation, *European Journal Of Operational Research*, Vol.129, pp.134-158, 2001.

W

(Ward et al., 1985) Ward P.T., Mellor S. J., *Structured development for real-time systems*, vol.1, 2 and 3, Yourdon Press, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.

(Weber et al., 1991) Weber C. A., Current J.R., Benton W.C., Vendor selection criteria and methods, *European Journal of Operational Research*, Vol.50, pp.2-18, 1991.

(Weber et Current, 1993) Weber C.A., Current J.R., A multiobjective approach to vendor selection, *European Journal of Operational Research*, Vol.68, No.2, pp.173-184, 1993.

(Williams, 1994) Williams T.J., The Purdue Enterprise Reference Architecture, *Computers in Industry*, Vol. 24, No.2/3, pp.141-158, 1994.

(WfMC, 2004) WfMC, The workflow reference model, *Workflow Management Coalition Technical report WfMC-TC00-1003*, Brussels, Belgium. www.wfmc.org, 2004.

Z

(Zhao et al., 2002) Zhao X., Xie J., Leung J., The impact of forecasting model selection on the value of information sharing in a supply chain, *European Journal of Operational Research*, Vol.142, pp.321-344, 2002.

(Zina, 2007) Zina S., Proposition d'un cadre de modélisation pour les applications PLM - Application à la gestion de configurations, *Thèse de Doctorat*, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2007.

(Zouari, 2007) Zouari A., Proposition de mécanismes de versionnement et d'agrégation des connaissances de domaine en conception collaborative de produits industriels, *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.

(Zouggar, 2009) Zouggar S., Etude de la Co-évolution produit/réseau de partenaires : évaluation de l'intégrabilité des partenaires potentiels pour accroître l'efficacité des projets de développement de produits, *Thèse de Doctorat*, Université de Bordeaux 1, 2009.

Liste des publications

Bouhaddou, I., Benabdelhafid, A., Ouzizi, L. and Benghabrit, Y., PLM (Product Lifecycle Management) approach to design a product and its optimized supply chain, *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, Vol.6, No.3/4, pp.255-275, 2014.

Bouhaddou, I., Benabdelhafid, A., Ouzizi, L., and Benghabrit, Y., PLM for supply chain optimization, In *Product Lifecycle Management -Towards Knowledge Rich Enterprises*, Rivest L., Bouras A. and Louhichi B. (Eds.), Vol. 338, pp.134-146, Springer, 2012. (ISBN 978-3-642-35757-2).

Bouhaddou, I., Benabdelhafid, A., Ouzizi, L. and Benghabrit, Y., An optimized framework of integrated logistics based on PLM, *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transportation (ICALT)*, Sousse, Tunisie, pp.438-443, 2013.

Bouhaddou I., Benabdelhafid A., Ouzizi L., and Benghabrit Y., PLM for supply chain optimization, *9th International Conference on Product Lifecycle Management (PLM)*, Montréal, Canada, 2012.

Bouhaddou I., Benabdelhafid A., Ouzizi L., and Benghabrit Y., PLM model integrating logistic constraints in the product lifecycle, *3^{ème} Conférence Internationale, Systèmes Industriels et Logistiques (SIL)*, Casablanca, Maroc, 2011.

Bouhaddou I., Benabdelhafid A., Ouzizi L., et Benghabrit Y., Elaboration d'un méta-modèle PLM pour la gestion des informations d'un produit tout au long de son cycle de vie , *7^{ème} Conférence Internationale, Conception et Production Intégrées (CPI)*, Oujda, Maroc, 2011.

ILOG Cplex

Le Logiciel Cplex offre un environnement de développement intégré de la modélisation à la résolution. Il utilise le langage OPL (Optimization Programming Language) pour la description des modèles mathématiques.

Nous présentons ci-après les modèles mathématiques relatifs à l'optimisation des coûts des maillons de la chaîne logistique.

Programme générique de l'approvisionnement :

```
{string} Fournisseurs ;
{string} MPr ;
{string} Transports ;
{string} SemiFini;
range Perodes ;
float Cout[Fournisseurs][MPr][Perodes] ;
float QttMax[MPr][Perodes][Fournisseurs];
float CapaciteTrans[Fournisseurs][Transports];
float CoutTrans[Fournisseurs][Transports][MPr][Perodes];
float Alpha[SemiFini][MPr];
float Beta[SemiFini];
float Gama [MPr];
float Quantite[Perodes];
dvar float+ QttAppr[Fournisseurs][MPr][Perodes];
dvar float+ QttApprMode[Fournisseurs][Transports][MPr][Perodes];
minimize
sum (f in Fournisseurs , m in MPr, t in Perodes)
Cout[f][m][t] * QttAppr[f][m][t]+
sum (f in Fournisseurs, r in Transports, m in MPr, t in Perodes )
CoutTrans[f][r][m][t] * QttApprMode[f][r][m][t];
subject to {
forall (f in Fournisseurs, m in MPr, t in Perodes)
ct1:
QttAppr[f][m][t] == QttMax[f][m][t];
forall (f in Fournisseurs, m in MPr, t in Perodes)
ct2:
sum(r in Transports)
QttApprMode[f][r][m][t]== QttAppr[f][m][t];
forall (f in Fournisseurs, t in Perodes, r in Transports)
ct3:
sum(m in MPr)QttApprMode[f][r][m][t] <= CapaciteTrans[f][r];
forall (f in Fournisseurs, m in MPr, t in Perodes)
ct4:
sum(f in Fournisseurs, t in Perodes)
QttAppr[f][m][t]== (sum (i in SemiFini) (Beta[i]*Alpha[i][m])+
Gama[m])*Quantite[t];
}
```

Programme générique de la production

```
{string} MatierePremiere ;
{string} SemiFini ;
{string} Machine ;
range Perodes ;
float Beta[SemiFini] ;
```

```

float Alpha[SemiFini][MatierePremiere] ;
float Gamma[MatierePremiere] ;
float Csi[SemiFini] ;
float Csj[MatierePremiere];
float CAPkt[Periodes][Machine] ;
float COkt[Periodes][Machine];
float CUkt[Periodes][Machine];
float Cpkt[Periodes][Machine] ;
float Qtj[Periodes][MatierePremiere];
float Qti[Periodes][SemiFini] ;
float Bti[Periodes][SemiFini];
float TUik[Machine][SemiFini] ;
float TUK[Machine] ;
dvar float+ Iit[Periodes][SemiFini];
dvar float+ Ijt[Periodes][MatierePremiere];
dvar float+ Okt[Periodes][Machine];
dvar float+ Ukt[Periodes][Machine];
dvar float+ Qt[Periodes];
minimize
sum (j in MatierePremiere , t in Periodes)
Csj[j] * Ijt[t][j] +
sum (i in SemiFini, t in Periodes)
Csi[i] * Iit[t][i] +
sum (k in Machine, t in Periodes)
COkt[t][k] * Okt[t][k] +
sum (k in Machine, t in Periodes)
CUkt[t][k] * Ukt[t][k] +
sum (k in Machine, t in Periodes)
Cpkt[t][k] * Qt[t];
subject to {
forall (k in Machine, t in Periodes)
CapaciteProductionProduitSemiFini:
sum(i in SemiFini)
TUik[k][i] * Beta[i] * Qt[t] + Ukt[t][k] == CAPkt[t][k] + Okt[t][k] ;
forall (k in Machine, t in Periodes)
CapaciteProductionProduitFini :
TUK[k] * Qt[t] + Ukt[t][k] == CAPkt[t][k] + Okt[t][k] ;
orall (i in SemiFini, j in MatierePremiere, t in Periodes: t == 1)
Qtj[t][j] + 0 == Alpha[i][j] * Beta[i] * Qt[t] + Gamma[j] * Qt[t] +
Ijt[t][j] + Alpha[i][j]*Dti[t][i] ;
forall (i in SemiFini, j in MatierePremiere, t in Periodes: t > 1)
Qtj[t][j] + Ijt[t-1][j] == Alpha[i][j] * Beta[i] * Qt[t] + Gamma[j] * Qt[t]
+ Ijt[t][j] + Alpha[i][j]*Dti[t][i] ;
forall (i in SemiFini, t in Periodes: t == 1)
Qti[t][i] + 0 == ( Beta[i] * Qt[t] + Dti[t][i])+ Iit[t][i];
forall (i in SemiFini, t in Periodes: t > 1)
Qti[t][i]+Iit[t-1][i] == ( Beta[i] * Qt[t] + Dti[t][i])+ Iit[t][i];
}

```

Programme générique du transport

```

{string}transportee ;
{string}entrepot ;
range periode ;
{string} transportec ;
{string} client ;
{string}entreprise ;
float quotaec[transportec];
float quataee[transportee];
float demandecl[periode][client];

```



```

float captransee[transportee];
float couttransec[transportec][entrepot][client];
float Q[periode][entreprise];
float captransec[transportec];
float couttransee[entrepot][transportee];
dvar float+ Qc [periode][entrepot][client][transportec];
dvar float+ Qe [periode][entrepot][transportee];

minimize
sum(t in periode,te in transportee,e in entrepot)
couttransee[e][te] *Qe[t][e][te] + sum(t in periode, e in entrepot,c in
client,tc in transportec)
couttransec[tc][e][c] *Qc[t][e][c][tc];
subject to {
forall(te in transportee)
ct1:
  sum(t in periode, e in entrepot)
  Qe[t][e][te] <= captransee[te]*quotaee[te];
forall(t in periode, tc in transportec)

ct2:
  sum(e in entrepot,c in client)
  Qc[t][e][c][tc] <= captransec[tc]*quotaec[tc];
forall(t in periode,e in entrepot, E in entreprise)
ct3:
  sum(te in transportee)
  Qe [t][e][te] == Q[t][E];
forall(t in periode, c in client,e in entrepot)
ct4:
  sum(tc in transportec)
Qc[t][e][c][tc] == demandecl [t][c];
}

```

Programme générique de stockage

```

{string}entrepot ;
{string}client ;
range periode ;
float quota[entrepot];
float capacite[entrepot] ;
float CS[entrepot] ;
float Qe [periode][entrepot];
float Qc [periode][entrepot][client];
dvar float+ W[entrepot][periode];
minimize
  sum (e in entrepot, t in periode)
  W[e][t]* CS[e];
  subject to {
forall(e in entrepot, t in periode)
ct1:
W[e][t]<=capacite[e]*quota[e];
forall(e in entrepot,t in periode: t == 1)
ct2:
W[e][t]== 0 + sum(e in entrepot) Qe[t][e]-sum(c in client,e in entrepot)
Qc[t][e][c];
forall(e in entrepot,t in periode: t > 1)
ct3:
W[e][t]== W[e][t-1]+sum(e in entrepot) Qe[t][e]-sum(c in client,e in
entrepot) Qc[t][e][c];
}

```

Introduction

L'encaissage des produits laitiers dans des casiers en plastique comme emballage secondaire pose de plus en plus de problèmes industriels et logistiques pour l'entreprise (fabricant de produits laitiers).

Pour réduire les coûts relatifs à cet emballage et éliminer les problèmes contraignants de gestion des retours de casiers vides, le changement de ce type d'emballage est devenu une nécessité pour l'entreprise. Cette dernière a opté pour le remplacement de ces casiers en plastique par des caisses en carton.

Plusieurs conceptions ont été étudiées. La conception de la caisse retenue ainsi que les résultats relatifs à l'optimisation de sa chaîne logistique sont présentées ci-après.

1. Conception du produit

- Plateau à verrouillage automatique ;
- Dimensions : 298*298*85 (mm) ;
- Caisse de 72 pots soit 12 barquettes de 6 pots sur deux étages ;
- Caisse en carton ondulé avec cannelure simple de type de C de 4 mm d'épaisseur ;
- Résistance à la compression verticale de 210 KgForce ;
- Résistance à l'éclatement de 800 KPa ;
- Résistance à l'humidité de 20 à 30 g/m³.

2. Conception de la chaîne logistique associée :

La figure ci-dessous représente la chaîne logistique étudiée : notre objectif est de sélectionner le meilleur fournisseur puis d'optimiser les quantités approvisionnées. Les autres maillons de la chaîne existent déjà, nous nous intéressons à optimiser les flux échangés entre eux.

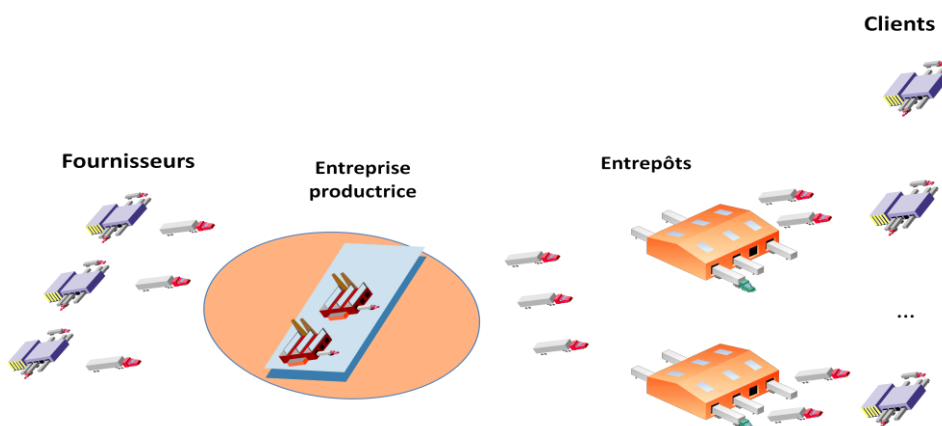


Schéma de la chaîne logistique étudiée

Le tableau suivant présente les prévisions de ventes des pots de yaourts

Prévisions des ventes de yaourts

Période (Année)	T1	T2	T3	T4	T5
Prévisions des ventes des yaourts (en nombre de pots)	158 935179	168 495 896	176 920 691	185 766 725	195 055 062

- **Approvisionnement du carton à plat :**

Nous rappelons que le fournisseur retenu pour l'approvisionnement du carton à plat est le fournisseur F2. Nous présentons le coût d'approvisionnement sur cinq ans ainsi que la quantité à s'approvisionner en carton pendant chaque période.

Résultats relatifs à l'optimisation de l'approvisionnement

Coût d'approvisionnement (en dirham marocain) : 11804217,6					
Période (année)	T1	T2	T3	T4	T5
Quantité optimale à s'approvisionner de carton à plat (en nbre d'unités)	2207434	2340221	2457232	2580094	2709099

- **Production de la caisse remplie**

Le coût de production comprend le coût des opérations de formage et d'encaissage de la caisse ainsi que le coût de stockage des emballages vides.

La nouvelle caisse d'emballage (plateau à verrouillage automatique) a nécessité l'achat de deux nouvelles machines : une encartonneuse et une encaisseuse.

Le coût de formage et d'encaissage en mode automatique prend en compte l'amortissement annuel des nouvelles machines, le coût d'électricité, le coût d'air comprimé, le coût de la maintenance et le coût moyen de la main d'œuvre (un seul opérateur).

Nous présentons le coût de production pendant 5 ans ainsi que la quantité de caisse pleine à produire ainsi que le niveau de stock (carton à plat et carton plié) durant chaque période. Sont présentées également les heures supplémentaires sur chaque machine. Le temps de pliage du carton est négligeable.

Résultats relatifs à l'optimisation de la production

Coût de production (en dirham marocain) : 2262475,04				
Quantité du produit à produire Qt (caisse remplie)				
2207434	2340221	2457232	2580094	2709099
Heures supplémentaires sur machine 1 en heures (encartonneuse)				
1607,4	1740,2	1857,2	1980,1	2109,1
Heures supplémentaires sur machine 2 en heures (encaisseuse)				
3580,9	3846,4	4080,5	4326,2	4584,2
Niveau de stock de matière première (carton à plat et carton plié)				
10556	12778	14583	20556	29722

- **Transport et stockage de la caisse remplie**

Notons que les moyens de transport et les entrepôts de stockage resteront les mêmes pour le nouveau produit. Ainsi, la conception de ces maillons concerne essentiellement l'optimisation des flux échangés.

Faute d'avoir les données relatives à tout le circuit de distribution, nous traitons, à titre d'exemple, le cas de deux clients de type GMS (Grandes et Moyennes Surfaces) : Marjane Meknès et Acima Meknès, desservies par les deux agences de Meknès (entrepôts de stockage).

La part des caisses du yaourt étudié par rapport aux autres produits laitiers frais dans les entrepôts et les moyens de transport est estimée à 19,72%.

Résultats relatifs à l'optimisation de transport et du stockage

Coût de transport (en dirham marocain) : 586,18				
Quantité transportée à l'entrepôt 1				
0	0	0	0	0
Quantité transportée à l'entrepôt 2				
712	770	880	900	925
Quantité transportée de l'entrepôt 2 vers le client 1				
465	585	659	671	678
Quantité transportée de l'entrepôt 2 vers le client 2				
142	156	178	196	215
Coût de stockage (en dirham marocain) : 850,64				
Quantité à stocker dans l'entrepôt 2				
105	134	177	210	242

Les deux clients étudiés sont approvisionnés par l'entrepôt 2. Nous avons optimisé les flux entre l'entrepôt 2 et les deux clients. Nous avons essentiellement optimisé les quantités transportées de l'entreprise de production à l'entrepôt et les quantités transportées de l'entrepôt aux clients ainsi que les quantités à stocker dans l'entrepôt.

Résumé

Consciente que l'unité de compétitivité n'est plus l'entreprise mais toute la chaîne logistique contribuant à la réalisation du produit, les efforts consentis par l'entreprise se matérialisent, d'une part, par la volonté de maîtriser au mieux les activités de conception des produits et d'autre part, par la construction de collaborations entre tous les acteurs de la chaîne logistique participant au cycle de vie du produit. Cela a conduit à l'émergence d'une gestion collaborative du cycle de vie du produit appelée communément PLM.

L'objet de cette thèse consiste à définir une démarche méthodologique pour répondre à la problématique suivante : Comment le PLM pourra-t-il participer à l'optimisation de la chaîne logistique ?

Nous adoptons, dans cette thèse, une approche hybride combinant PLM et modèles mathématiques pour optimiser les décisions de conception simultanée du produit et de sa chaîne logistique. Nous proposons des modèles conceptuels pour résoudre de manière formelle le compromis entre PLM et modèles mathématiques pour une optimisation de la chaîne logistique.

Contrairement aux approches classiques centralisées utilisées pour traiter le problème intégré de conception du produit et de sa chaîne logistique et qui engendrent des modèles mathématiques compliqués, nous adoptons une démarche couplant des décisions centralisées quand il s'agit d'intégrer les contraintes des différents maillons de la chaîne logistique et une approche décentralisée quand il s'agit d'optimiser localement chaque maillon de la chaîne.

Le mode décentralisé réduit la complexité de résolution des modèles mathématiques et permet à la chaîne logistique de répondre rapidement à l'évolution des conditions locales de chaque maillon.

Le PLM joue le rôle d'intégrateur. En effet, le regroupement centralisé des informations par le PLM permet de prendre en considération la dépendance entre les maillons améliorant ainsi les résultats obtenus par optimisation locale.

Mots-clés : PLM (Product Lifecycle Management), chaîne logistique, conception du produit, conception de la chaîne logistique, modèles mathématiques d'optimisation, logistique intégrée.

Abstract

It is recognized that competition is shifting from "firm versus firm" perspective to "supply chain versus supply chain" perspective. Therefore, the ability to optimize the supply chain is becoming the critical issue for companies to win the competitive advantage.

Furthermore, all members of a given supply chain must work together to respond to the changes of market demand rapidly. In the actual context, enterprises not only must enhance their relationships with each others, but also need to integrate their business processes through product life cycle activities. This has led to the emergence of a collaborative product lifecycle management commonly known as PLM.

The objective of this thesis is to define a methodological approach which answers to the following problematic: How can PLM contribute to supply chain optimization?

We adopt, in this thesis, a hybrid approach combining PLM and mathematical models to optimize decisions for simultaneous design of the product and its supply chain. We propose conceptual models to solve formally the compromise between PLM and mathematical models for supply chain optimization.

Unlike traditional centralized approaches used to treat the problem of integrated design of the product and its supply chain which generate complex mathematical models, we adopt an approach combining centralized decisions while integrating the constraints of the different supply chain partners during the product design and decentralized decisions when it comes to locally optimize each supply chain partner.

The decentralized approach reduces the complexity of solving mathematical models and allows the supply chain to respond quickly to the evolution of local conditions of each partner.

PLM will assure the integration of the different supply chain partners. Indeed, the information centralization by the PLM enables to take into consideration the dependence between these partners, improving therefore local optimization results.

Keywords: PLM (Product Lifecycle Management), supply chain, product design, supply chain design, optimization mathematical models, integrated logistics.
