



HAL
open science

Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés

Mustapha Sali

► **To cite this version:**

Mustapha Sali. Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés. Gestion et management. Université Paris Dauphine - Paris IX, 2012. Français. NNT : 2012PA090037 . tel-00776217

HAL Id: tel-00776217

<https://theses.hal.science/tel-00776217>

Submitted on 15 Jan 2013

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

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

UNIVERSITÉ PARIS-DAUPHINE

École Doctorale de Gestion

Thèse

Pour l'obtention du titre de

Docteur en sciences de gestion

Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés

Candidat : Mustapha SALI

Membres du Jury

Directeur de thèse : Vincent GIARD, Professeur à l'Université Paris-Dauphine

Rapporteurs : Claude PELLEGRIN, Professeur à l'Université Lumière Lyon 2

Frédéric GAUTIER, Professeur à l'Université Paris X Nanterre

Suffragants : Samir LAMOURI, Professeur à l'ENSAM

Denis BOUYSSOU, Directeur de Recherche au CNRS

Pierre FÉNIÈS, Professeur à l'Université Paris X Nanterre

Aimé-Frédéric ROSENZWEIG, Directeur de la Planification et
des Projets Logistiques, Renault.

Présenté et soutenu le 6 Novembre 2012

Remerciements

Je remercie toutes celles et tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

Ma gratitude va également vers celles et ceux qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mon projet de thèse.

Dédicaces

À mes parents, mes frères, mes amis et à celles et ceux qui se sentiront honorés par
l'aboutissement de ce travail.

Abréviations et acronymes

ANRT	Association Nationale pour la Recherche en Technologie
BB	Besoin Brut
BN	Besoin Net
BWE	Bullwhip Effect
Cal.	Calendrier
Capa.	Capacité
CIFRE	Convention Industrielle de Financement par la REcherche
CL	Chaîne Logistique
DC	Demande Commerciale
DL	Demande de Livraison
Doc.	Documentation
DOP	Département d'Organisation des Processus
DRP	Distribution Ressource Planning
DSCM	Direction de la Supply Chain Monde
ECF	Effet Coup de Fouet
FAI	Forecast Accuracy Index
GALIA	Groupement pour l'Amélioration des Liaisons dans l'Industrie Automobile
LP	Lancement Programmé (en Production)
MRP	Material Requirement Planning
OF	Ordre de Fabrication
PDFV	Plan Directeur de Fabrication Véhicules
PDP	Plan Directeur de Production
PPC	Point de Pénétration de la Commande
PS	Pseudo véhicule
PV	Prévision en versions
RIDC	Réponse Industrielle à la Demande Commerciale
RIDCD	Réponse Industrielle à la Demande Commerciale Découpée
SC	Stock-Cible
Sc.	Scénario
SI	Système d'Information
TV	Taux de Version
UCM	Usine de Carrosserie et de Montage
UM	Usine de Mécanique
VCD	Véhicule Complètement Défini

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE. PILOTAGE DES APPROVISIONNEMENTS EN CL-AMONT : VERS UN QUESTIONNEMENT DES CAUSES DE L'EFFET COUP DE FOUET	6
CHAPITRE I CADRE DE LA RECHERCHE ET PROBLÉMATIQUE	7
<i>Introduction</i>	7
1. <i>Présentation du cadre de la recherche et définition des objectifs</i>	7
1.1. Cadre de la recherche	7
1.2. Objectifs de la recherche	8
2. <i>Organisation du travail de recherche</i>	9
2.1. Instances de gestion et de contrôle	9
2.2. Macro-planning du projet de thèse	10
3. <i>Contexte industriel et économique de la recherche</i>	11
3.1. De la production unitaire à la production de masse de produits fortement diversifiés	11
3.1.1. La production unitaire	11
3.1.2. La production de masse standardisée	12
3.1.3. La production de masse diversifiée	12
3.1.4. La personnalisation de masse	12
3.2. Contexte économique de l'industrie automobile	15
4. <i>Problématique de la gestion des approvisionnements en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés</i>	17
<i>Conclusion</i>	18
CHAPITRE II. L'ECF ET LE PARTAGE D'INFORMATIONS DANS LA CL : UNE LITTÉRATURE CONTINGENTE	20
<i>Introduction</i>	20
1. <i>Méthodologie d'analyse de la littérature</i>	21
2. <i>Analyse de la littérature</i>	24
2.1. Axe 1 : Objectif de l'article	24
2.2. Axe 2 : Type de décision	25
2.3. Axe 3 : Structure de la CL	25
2.4. Axe 4 : Type de produits finis	27

2.5. Axe 5 : Position du flux dans la CL-----	29
2.6. Axe 6 : Modélisation de la demande-----	29
2.7. Axe 7 : Modèle de commande-----	31
2.8. Axe 8 : Causes de l'ECF -----	33
2.9. Axe 9 : Information partagée -----	34
2.10. Axe 10 : Modélisation-----	35
2.11. Axe 11 : Mesure de la performance -----	36
2.12. Axe 12 : Analyse de l'impact -----	37
<i>Conclusion</i> -----	38
CHAPITRE III. CADRE DE RÉFÉRENCE DE L'ÉTUDE-----	41
<i>Introduction</i> -----	41
<i>1. Pilotage des flux et partage d'informations en CL - amont</i> -----	41
1.1. Modes de pilotage en CL-----	41
1.2. Partage d'informations et aspects contractuels entre Renault et ses fournisseurs -----	42
<i>2. Le Material Requirement Planning</i> -----	45
2.1. Généralité sur la MRP -----	45
2.1.1. Conditions de mise en œuvre de la MRP -----	45
2.1.2. Horizons du PDP -----	46
2.1.3. Mécanismes de la MRP -----	48
2.1.4. Politiques de lotissement en MRP -----	48
2.2. La MRP chez Renault-----	49
<i>3. Organisation des nomenclatures</i> -----	51
3.1. Nomenclatures en production fortement diversifiée-----	51
3.2. Particularité des nomenclatures chez Renault -----	56
<i>4. Origines de l'ECF en CL - amont</i> -----	58
<i>Conclusion</i> -----	61
DEUXIÈME PARTIE. MÉCANISMES A L'ORIGINE DE LA VARIABILITÉ DE LA DEMANDE PRÉVISIONNELLE ET DE LA DÉFORMATION DE LA DEMANDE COMMERCIALE	62
CHAPITRE IV. GENÈSE ET MESURE DE LA VARIABILITÉ DES PRÉVISIONS DE LA DEMANDE INDUITE PAR LE MODÈLE DE PLANIFICATION DE RENAULT -----	63
<i>Introduction</i> -----	63
<i>1. Modèle de planification et de gestion des approvisionnements Renault</i> -----	63

2. Mesure de la variabilité des prévisions de la demande -----	67
2.1. Indicateur de variabilité -----	67
2.2. Limites d'interprétation et de mesure du FAI -----	70
2.3. Résultats des mesures de variabilité sur un exemple réel -----	70
<i>Conclusion</i> -----	72

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS -----73

<i>Introduction</i> -----	73
---------------------------	----

1. Processus de déclinaison de la demande commerciale en prévisions de demande de véhicules -74

1.1. Modélisation des sous-processus de déclinaison de la demande commerciale -----	74
1.1.1. Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	74
1.1.1.1. Modélisation -----	76
1.1.1.2. Illustration numérique -----	78
1.1.1.2.1. Données d'entrée-----	78
1.1.1.2.2. Paramètres d'optimisation -----	79
1.1.1.2.3. Résultats de l'optimisation-----	79
1.1.1.3. Commentaires sur la construction de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	80
1.1.2. Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale-----	80
1.1.2.1. Modélisation -----	81
1.1.2.2. Illustration numérique -----	84
1.1.2.2.1. Données d'entrée-----	84
1.1.2.2.2. Paramètres d'optimisation -----	86
1.1.2.2.3. Résultats de l'optimisation-----	86
1.1.2.3. Commentaires sur la découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	86
1.1.3. Construction des prévisions en version-----	87
1.1.3.1. Modélisation -----	88
1.1.3.2. Illustration numérique -----	90
1.1.3.2.1. Données d'entrée-----	90
1.1.3.2.2. Paramètres d'optimisation -----	91
1.1.3.2.3. Résultats d'optimisation-----	91
1.1.3.3. Commentaires sur la construction des prévisions en versions -----	91
1.1.4. Construction des prévisions en véhicules complètement définis -----	92
1.1.4.1. Modélisation -----	93

1.1.4.1.1. Étape 1 : calcul des probabilités conditionnelles -----	95
1.1.4.1.2. Étape 2 : tirage aléatoire -----	96
1.1.4.2. Illustration numérique -----	97
1.1.4.2.1. Données d'entrée -----	97
1.1.4.2.2. Paramètres d'optimisation -----	97
1.1.4.2.3. Résultats d'optimisation -----	97
1.1.4.3. Commentaires sur la construction des prévisions en véhicules complètement définis -----	102
1.1.5. Construction du plan directeur de fabrication de véhicules -----	102
1.1.5.1. Modélisation -----	103
1.1.5.2. Illustration numérique -----	105
1.1.5.2.1. Données d'entrée -----	105
1.1.5.2.2. Paramètres d'optimisation -----	107
1.1.5.2.3. Résultats d'optimisation -----	107
1.1.5.3. Commentaires sur la construction du plan directeur de fabrication de véhicules -----	111
1.2. Simulation -----	111
1.2.1. Analyse des facteurs de déformation -----	114
1.2.1.1. Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	114
1.2.1.2. Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	116
1.2.1.3. Construction des prévisions en versions -----	117
1.2.1.4. Construction des prévisions en véhicules complètement définis -----	120
1.2.1.5. Construction du plan directeur de fabrication de véhicules -----	120
1.2.2. Analyse des facteurs d'instabilité -----	122
1.2.2.1. Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	123
1.2.2.1.1. Variation du volume du plan de montage -----	123
1.2.2.1.2. Variation du mix de la demande commerciale -----	125
1.2.2.2. Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale -----	126
1.2.2.3. Construction des prévisions en versions -----	127
1.2.2.4. Construction des prévisions en véhicules complètement définis -----	129
1.2.2.4.1. Tirage aléatoire -----	129
1.2.2.4.2. Modification de la documentation -----	130
1.2.2.5. Construction du plan directeur de fabrication de véhicules -----	131
2. <i>Processus de calcul et d'expression des besoins</i> -----	132
2.1.1. Modélisation -----	133
2.1.1.1. Calcul des besoins bruts sur l'horizon de planification -----	134

2.1.1.2. Calcul des lancements en production en semaine s-----	134
2.1.2. Illustration numérique -----	135
2.1.2.1. Données d'entrée-----	135
2.1.2.2. Paramètres de calcul -----	135
2.1.2.3. Résultats du calcul -----	136
2.1.3. Commentaires sur le processus de calcul et d'expression des besoins-----	137
<i>Conclusion</i> -----	139

TROISIÈME PARTIE. PILOTAGE D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE AMONT DÉDIÉE À LA PRODUCTION DE MASSE DE PRODUITS FORTEMENT DIVERSIFIÉS PAR UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP **144**

CHAPITRE VI. PILOTAGE DES FLUX-AMONT PAR L'EXPLOITATION DES INFORMATIONS COMMERCIALES DANS UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP--- **145**

<i>Introduction</i> -----	145
<i>1. Le traitement de l'incertitude dans la MRP</i> -----	147
1.1. Prise en compte de l'incertitude dans l'approche classique de la MRP-----	147
1.1.1. Horizon gelé et PPC -----	148
1.1.2. Nomenclature de planification-----	149
1.2. L'incertitude en MRP dans la littérature -----	150
<i>2. Modélisation</i> -----	156
2.1. Principes de la politique de reapprovisionnement calendaire -----	156
2.2. Adaptation de la MRP pour tenir compte du caractère aléatoire du PDP hors horizon gelé et d'éventuels problèmes de qualité-----	158
2.2.1. Lancement en production tenant compte d'une demande finale partiellement aléatoire, en l'absence de problème de qualité-----	159
2.2.2. Lancement en production tenant compte d'une demande finale partiellement aléatoire, en présence de problèmes de qualité. -----	163
2.3. Optimisation économique du risque α -----	166
2.3.1. Possibilité d'avoir recours à des procédures d'urgence -----	166
2.3.1.1. Nullité du coût fixe d'un approvisionnement en urgence-----	168
2.3.1.2. Nullité du coût variable direct des unités approvisionnées en urgence -----	169
2.3.1.3. Coût fixe et coût variable direct des unités approvisionnées en urgence non nuls -----	170
2.3.2. Impossibilité d'avoir recours à des procédures d'urgence-----	170
<i>3. Illustration numérique</i> -----	171
3.1. Illustration des relations à utiliser en l'absence de problème de qualité -----	174

3.1.1. Production à la commande en l'absence de problème de qualité -----	174
3.1.2. Production partiellement pour stock en l'absence de problème de qualité -----	175
3.2. Illustration des relations à utiliser en présence de problème de qualité -----	178
3.2.1. Détermination du stock-cible pour contrer les problèmes de qualité dans le cas où les besoins bruts sont certains -----	178
3.2.2. Production partiellement pour stock en présence de problèmes de qualité -----	179
<i>Conclusion</i> -----	181
CHAPITRE VII. MISE EN ŒUVRE ET BENCHMARKS -----	183
<i>Introduction</i> -----	183
1. <i>Méthodologie</i> -----	183
1.1. Sélection des cas d'application -----	184
1.2. Modélisation et simulation -----	186
2. <i>Description des cas d'application</i> -----	188
2.1. Cas 1 -----	189
2.2. Cas 2 -----	191
2.3. Cas 3 -----	194
3. <i>Résultats</i> -----	196
3.1. Cas 1 -----	197
3.2. Cas 2 -----	198
3.3. Cas 3 -----	199
<i>Conclusion</i> -----	199
CONCLUSION GÉNÉRALE -----	201
BIBLIOGRAPHIE -----	206
ANNEXES -----	213

Liste des Tableaux

PREMIÈRE PARTIE. PILOTAGE DES APPROVISIONNEMENTS EN CL-AMONT : VERS UN QUESTIONNEMENT DES CAUSES DE L'EFFET COUP DE FOUET

CHAPITRE I. CADRE DE LA RECHERCHE ET PROBLÉMATIQUE

Tableau I- 1 : Macro- planning du projet de thèse 10

CHAPITRE II. L'ECF ET LE PARTAGE D'INFORMATIONS DANS LA CL : UNE LITTÉRATURE CONTINGENTE

Tableau II- 1 : Liste des articles sélectionnés pour la revue de littérature 21

Tableau II- 2 : Analyse de la littérature sur l'ECF et l'échange d'informations en CL 23

Tableau II- 3 : Positionnement de la problématique par rapport à la grille d'analyse de la littérature . 39

CHAPITRE III. CADRE DE RÉFÉRENCE DE L'ÉTUDE

Tableau III- 1 : Informations partagées par Renault avec ses fournisseurs de premier rang 43

Tableau III- 2 : Demande capacitaire 43

Tableau III- 3 : Demandes fermes et prévisionnelles 44

DEUXIÈME PARTIE. MÉCANISMES A L'ORIGINE DE LA VARIABILITÉ DE LA DEMANDE PRÉVISIONNELLE ET DE LA DÉFORMATION DE LA DEMANDE COMMERCIALE

CHAPITRE IV. GENÈSE ET MESURE DE LA VARIABILITÉ DES PRÉVISIONS DE LA DEMANDE INDUITE PAR LE MODÈLE DE PLANIFICATION DE RENAULT

Tableau IV- 1 : Exemple de calcul de FAI 69

Tableau IV- 2 : FAI moyen par catégorie de composant 71

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Tableau V- 1 : Demande Commerciale (DC) 78

Tableau V- 2 : Volume du plan de montage (V) 78

Tableau V- 3 : Capacités (Capa) 79

Tableau V- 4 : Ordres de fabrication (OF) 79

Tableau V- 5 : Documentation (Doc) 79

Tableau V- 6 : Réponse Industrielle à la Demande Commerciale (RIDC) 79

Tableau V- 7 : Capacités (Capa) et Ordres de fabrication (OF) 84

Tableau V- 8 : Calendrier (Cal) 85

Tableau V- 9 : Documentation (Doc) 85

Tableau V- 10: Réponse Industrielle à la Demande Commerciale Découpée(RIDCD)	86
Tableau V- 11 : Taux de Version (TV)	90
Tableau V- 12 : Prévisions en Version (PV)	91
Tableau V- 13 : Probabilités conditionnelles des critères d’objets optionnels connaissant les versions (issues des historiques).....	98
Tableau V- 14 : Documentation (Doc).....	99
Tableau V- 15 : Probabilités conditionnelles des critères d’objets optionnels connaissant les versions	100
Tableau V- 16 : Prévisions en véhicules complètement définis (VCD).....	101
Tableau V- 17 : Calendrier industriel (Cal).....	107
Tableau V- 18 : Ordres de fabrication complètement définis	106
Tableau V- 19 : Pseudos véhicules à défalquer définis selon les objectifs de décrémentation	108
Tableau V- 20 : Pseudos-véhicules à défalquer complètement définis	109
Tableau V- 21 : Plan directeur de fabrication de véhicules (OF et PS).....	110
Tableau V- 22 : Scénarios simulés	113
Tableau V- 23 : Taux de variation entre la réponse industrielle à la demande commerciale et la demande commerciale.....	115
Tableau V- 24 : Taux de variation entre la réponse industrielle à la demande commerciale découpée et la réponse industrielle à la demande commerciale	116
Tableau V- 25 : Taux de variation entre la prévision en version et la réponse industrielle à la demande commerciale découpées.....	119
Tableau V- 26 : Taux de variation entre la prévision en véhicules complètement définis et le plan directeur de fabrication de véhicules pour les motorisations	121
Tableau V- 27 : Taux de variation entre la prévision en véhicules complètement définis et le plan directeur de fabrication de véhicules pour les niveaux d’équipement.....	122
Tableau V- 28 : Taux de variation moyens entre le scénario 3 et le scénario 1	124
Tableau V- 29 : Taux de variation relatif de la demande commerciale.....	125
Tableau V- 30 : Taux de variation moyens entre le scénario 4 et le scénario 1	125
Tableau V- 31 : Taux de variation de la RIDCD entre le scénario 6 et le scénario 1	126
Tableau V- 32 : Taux de variation du plan directeur de fabrication de véhicules entre le scénario 6 et le scénario 1.....	127
Tableau V- 33 : Taux de variation moyens entre le scénario 10 et le scénario 1	128
Tableau V- 34 : Taux de variation moyens entre le scénario 2 et le scénario 1	129
Tableau V- 35 : Résultat de simulation de génération de VCD	130
Tableau V- 36 : Taux de variation moyens entre le scénario 11 et le scénario 1 et entre le scénario 12 et le scénario 1.....	131

Tableau V- 37 : Taux de variation du plan directeur de fabrication de véhicules entre le scénario 14 et le scénario 15.....	132
Tableau V- 38 : Caractéristiques des composants.....	135
Tableau V- 39 : Stock détenu et livraisons attendues.....	135
Tableau V- 40 : Paramètres de stock de sécurité.....	136
Tableau V- 41 : calcul de MRP en $s = 0$ pour les composants $h = 1$ et $h = 2$ (LP).....	137
Tableau V- 42 : Facteurs de déformation de la demande commerciale et d'instabilité des processus de déclinaison de la demande commerciale et de calcul des besoins.....	141

TROISIÈME PARTIE. PILOTAGE D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE AMONT DÉDIÉE À LA PRODUCTION DE MASSE DE PRODUITS FORTEMENT DIVERSIFIÉS PAR UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP

CHAPITRE VI. PILOTAGE DES FLUX-AMONT PAR L'EXPLOITATION DES INFORMATIONS COMMERCIALES DANS UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP

Tableau VI- 1 : Illustration du mode de fonctionnement MRP en univers certain.....	173
Tableau VI- 2 : Valeurs des λ_{ik} pour les pistons et têtes de piston.....	174
Tableau VI- 3 : Décomposition de la demande de têtes de piston en $t=2$ et $t=3$	176
Tableau VI- 4 : Niveau de rechargement des têtes de piston en fonction de α	176
Tableau VI- 5 : Détermination du nombre de têtes de piston lancées en production en $t=1$, en l'absence de problèmes de qualité.....	177
Tableau VI- 6 : Détermination du nombre de têtes de pistons lancés en production en $t=2$, en l'absence de problèmes de qualité.....	178
Tableau VI- 7 : Détermination du nombre de pistons lancés en production en $t=1$, en cas de problèmes de qualité sur les seuls pistons.....	179
Tableau VI- 8 : Stock-cible des pistons en fonction de α , pour un besoin brut de 6050.....	179
Tableau VI- 9 : Plage de valeurs de besoins bruts nécessitant le stock-cible SC pour $\pi=0,01\%$	179
Tableau VI- 10 : Détermination du nombre de têtes de pistons lancés en production en $t=1$, en présence de problèmes de qualité.....	180

CHAPITRE VII. MISE EN ŒUVRE ET BENCHMARKS

Tableau VII- 1:Données d'entrée de la solution proposée (Cas1).....	191
Tableau VII- 1:Données d'entrée de la solution proposée (Cas2).....	193
Tableau VII- 1:Données d'entrée de la solution proposée (Cas3).....	195
Tableau VII- 2 : Performance relative (Cas 1)	197
Tableau VII- 3 : Performance relative (Cas 2)	198
Tableau VII- 4 : Performance relative (Cas 3)	199

Liste des Figures

PREMIÈRE PARTIE. PILOTAGE DES APPROVISIONNEMENTS EN CL-AMONT : VERS UN QUESTIONNEMENT DES CAUSES DE L'EFFET COUP DE FOUET

CHAPITRE I. CADRE DE LA RECHERCHE ET PROBLÉMATIQUE

Figure I- 1 : Nouvelle distribution (Souilah, 2008).....	14
Figure I- 2 : Pourcentage des ventes et de la production du groupe Renault réalisées hors Europe entre 2009 et 2011 (Renault S.A., 2010) (Renault S.A., 2011).....	17

CHAPITRE III. CADRE DE RÉFÉRENCE DE L'ÉTUDE

Figure III- 1 : Horizons de la MRP	47
Figure III- 2 : Cercle vicieux de (Childerhouse et al., 2008).....	59
Figure III- 3 : ECF en CL - amont.....	60

DEUXIÈME PARTIE. MÉCANISMES A L'ORIGINE DE LA VARIABILITÉ DE LA DEMANDE PRÉVISIONNELLE ET DE LA DÉFORMATION DE LA DEMANDE COMMERCIALE

CHAPITRE IV. GENÈSE ET MESURE DE LA VARIABILITÉ DES PRÉVISIONS DE LA DEMANDE INDUITE PAR LE MODÈLE DE PLANIFICATION DE RENAULT

Figure IV- 1 : Processus de déclinaison de la demande commerciale en plan directeur de fabrication véhicules et calcul et expression des besoins	66
--	----

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Figure V- 1 : Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale	75
Figure V- 2 : Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale	80
Figure V- 3 : Construction des prévisions en version	87
Figure V- 4 : Construction des prévisions en véhicules complètement définis.....	93
Figure V- 5 : Construction du plan directeur de fabrication de véhicules.....	103
Figure V- 6 : Demande commerciale et réponse industrielle à la demande commerciale pour Mo3 dans le scénario 17.....	115
Figure V- 7 : Demande commerciale et réponse industrielle à la demande commerciale pour NE1 dans le scénario 18.....	115
Figure V- 8 : Réponse industrielle à la demande commerciale et prévisions en versions pour Mo3..	118
Figure V- 9 : Réponse industrielle à la demande commerciale et prévisions en versions pour NE3 ..	118
Figure V- 10 : Processus de calcul et d'expression des besoins.....	133

Figure V- 11 : Risque de rupture associé à la loi de flexibilité en fonction du prix du composant et de la production périodique globale.....	138
---	-----

TROISIÈME PARTIE. PILOTAGE D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE AMONT DÉDIÉE À LA PRODUCTION DE MASSE DE PRODUITS FORTEMENT DIVERSIFIÉS PAR UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP

CHAPITRE VI. PILOTAGE DES FLUX-AMONT PAR L'EXPLOITATION DES INFORMATIONS COMMERCIALES DANS UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP

Figure VI- 1: Sous-ensemble d'une CL automobile à quatre échelons.....	171
Figure VI- 2 : Nomenclature, coefficient de nomenclature (c) et délais d'obtention (L).....	172
Figure VI- 3 : Distribution de probabilité de Y, demande de référence des têtes de piston en régime de croisière	176

CHAPITRE VII. MISE EN ŒUVRE ET BENCHMARKS

Figure VII- 1 : Logigramme de sélection des cas d'application.....	185
Figure VII- 2 : Méthodologie d'analyse comparative	187
Figure VII- 3: Répartition de la valeur des composants approvisionnés pour un véhicule moyen selon la nature des composants.....	189
Figure VII- 4 : Flux physiques, liens de nomenclature et décalages (Cas 1)	190
Figure VII- 5 : Flux physiques, liens de nomenclature et décalages (Cas 2)	192
Figure VII- 6: Flux physiques, liens de nomenclature et décalages (Cas 3)	194

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un contexte concurrentiel toujours plus dur, les industriels doivent non seulement adapter sans cesse leur portefeuille de produits à une demande changeante et de plus en plus exigeante en termes d'innovation, de qualité, de diversité et de prix mais aussi améliorer sans relâche leurs processus de production, d'approvisionnement et de distribution. Pour ceux qui sont impliqués dans la production de masse de produits fortement diversifiés, comme c'est le cas des constructeurs automobile, le raisonnement ne peut être local mais global et doit s'inscrire dans une vision de Chaîne Logistique (CL).

Les différents maillons d'une CL sont reliés, deux à deux, par des flux de produits et d'informations. Dans la CL - amont – qui va de la ligne d'assemblage en aval aux fournisseurs de composants en amont – ce sont les décisions de production du dernier maillon qui, en définitive, tirent la production. L'idée d'un pilotage centralisé de la chaîne sous la responsabilité de ce dernier maillon se heurte à deux obstacles majeurs : les autres maillons de la chaîne appartiennent généralement à des entreprises juridiquement indépendantes ; par ailleurs, un maillon donné de la chaîne peut appartenir à plusieurs CLs (les CLs de PSA et de Renault ont de nombreux maillons en commun). Les effets pervers de décisions prises sur la base d'informations locales sont bien connus dans la CL - aval, en particulier pour les produits standardisés de grande consommation (l'exemple du jeu de la bière étant classique) : ils se traduisent par une propagation d'oscillations de la demande d'amplitude croissante en remontant le long de la chaîne. Ce phénomène, mis en évidence par Forrester (1961), est connu, depuis une quinzaine d'années, sous le nom d'Effet Coup de Fouet (ECF).

Des effets similaires existent dans la CL - amont mais leurs ampleurs et les mécanismes de propagation sont mal identifiés. Ce problème, déjà peu évident pour tout ce qui intervient dans la fabrication des composants systématiquement utilisés sur la ligne d'assemblage final, se complique singulièrement lorsqu'on s'intéresse aux composants optionnels (par exemple, toits ouvrants sur une ligne d'assemblage de véhicules) ou alternatifs (par exemple, boîtes de vitesse) spécifiques à la production diversifiée. Les causes, qui sont à l'origine des perturbations observées en CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiée, peuvent être rangées dans deux familles de causes génériques. La première famille est liée aux politiques commerciales des entreprises ; les actions tarifaires et le lancement de séries limitées jouent sur le volume et la structure de la demande à l'origine des phénomènes

d'ECF en CL-amont. La deuxième famille de causes est liée aux règles de pilotage des flux en CL-amont susceptibles d'amplifier la variabilité de la demande. C'est sur cette deuxième famille de causes que nous focaliserons notre intérêt.

La solution de partage d'informations, souvent avancée comme pouvant permettre de contrer l'ECF, ne peut être utilisée sans quelques précautions dans la CL - amont en raison des mécanismes d'explosion des nomenclatures et de décalage par les délais. L'information utilisée dans le pilotage des flux-amont par le dernier maillon productif provient nécessairement d'une planification de la production elle-même issue de prévisions de ventes. Les quelques études qui se sont intéressés aux phénomènes d'ECF en CL - amont, mettent en relief les mécanismes de perturbations qui trouvent leur origine dans l'association d'une planification instable à des méthodes de sécurisation inadaptées. L'instabilité des prévisions relève de l'incertitude naturelle qui pèse sur des demandes futures. Lorsqu'elle n'est pas exacerbée par des règles de gestion qui introduisent une variabilité additionnelle, l'incertitude sur la demande peut être contenue par des méthodes de sécurisation efficaces. De nombreux problèmes méthodologiques restent à mettre en évidence et à résoudre quant à l'exploitation de l'information prévisionnelle et la mise en place de méthodes de sécurisation permettant d'endiguer les fluctuations de la demande en CL - amont.

Les écrits dont on dispose sont peu nombreux. La littérature traitant de l'ECF n'est que partiellement pertinente pour la CL - amont. Les travaux effectués depuis plusieurs années par le LAMSADE (LABoratoire de Modélisation et de Simulation pour l'Aide à la DÉcision) en partenariat avec Renault, ont permis d'avancer de manière significative sur la production synchrone, le Point de Pénétration de Commande (PPC) (Mendy-Bilek, 2007) et la compréhension de ce qu'est la capacité d'une CL (Camisullis, 2008). Ils constituent une base à compléter par d'autres travaux pour mieux comprendre ces mécanismes de propagation.

Cette thèse a pour objet de mieux comprendre les mécanismes générateurs d'oscillations amplifiées de la demande dans la CL - amont, de mettre en évidence les principes de propagation d'informations permettant de limiter ces perturbations et de chercher des mécanismes de coopération permettant d'améliorer l'efficacité et l'efficience¹ de la CL - amont.

¹ Par efficacité nous entendons l'aptitude à honorer l'exigence de taux de service préalablement fixé, et par efficience nous entendons la capacité à remplir l'exigence d'efficacité à moindre coût.

Le présent document est la restitution du travail réalisé dans le cadre de la thèse « Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés ». Il est organisé en sept chapitres regroupés en trois parties.

La première partie est constituée des chapitres I, II et III. Elle a pour objet de fixer les cadres pratique et théorique de la recherche et de poser l'hypothèse centrale de la thèse sur l'origine des oscillations amplifiées de la demande dans la CL – amont. Le chapitre I fournit les spécificités du contexte de la recherche et présente la problématique de terrain proposée par l'industriel Renault. Dans le chapitre II, à travers une analyse fine de la littérature, nous montrons comment le contexte pratique, décrit en chapitre I, est susceptible de permettre une contribution originale au sujet de l'ECF en CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés. La projection de la problématique de terrain sur une grille d'analyse construite à partir d'une revue de la littérature spécialisée permet d'inscrire le sujet de thèse dans un champ de recherche important en gestion de la CL (l'ECF et le partage d'informations en CL) et d'identifier un contexte peu étudié par la littérature (le pilotage de la CL-amont en production de masse de produits fortement diversifiés). En s'appuyant sur une étude du contexte du pilotage des flux en CL-amont chez Renault, le chapitre III conduit à poser l'hypothèse théorique au cœur de la thèse sur l'origine de l'ECF en CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés. Le cercle vicieux proposé par Childerhouse et al. (2008) et sa propagation en CL-amont servent de support à la formalisation de l'hypothèse de recherche liée à la problématique proposée par Renault; le processus de transformation de la demande commerciale, information de référence utilisée pour le pilotage de la CL-amont, en prévision de demande de véhicules puis en demandes en composants est supposé être à l'origine des perturbations observées en CL-amont. La thèse devient alors une contribution à la problématique générale qui a trait au mode d'exploitation de la demande prévisionnelle en CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiée.

Dans la deuxième partie, constituée des chapitre IV et V, nous cherchons à valider l'hypothèse de recherche posée en première partie. Dans le chapitre IV, nous introduisons un indicateur utilisé pour mesurer la variabilité et les déformations¹ générées par chacune des

¹ La variabilité n'a de sens que dans un fonctionnement dynamique des processus de planification. Elle fait référence à l'écart relatif entre des quantités de même nature calculées à des instants différents. La déformation est un écart relatif mesuré à un instant donné entre une donnée d'entrée et une donnée de sortie.

étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale en prévision de demande de véhicules. Les mesures réalisées sur un échantillon issu du terrain permettent d'approuver empiriquement l'hypothèse de recherche. Pour renforcer ce résultat empirique, le chapitre V propose une décomposition et une analyse fine des étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale et de calcul des besoins. La modélisation de ces étapes, indispensable au recueil d'informations complémentaires, nous permet de simuler leur fonctionnement séquentiel en environnement contrôlé et de mesurer la variabilité et les déformations introduites par le processus de planification de la demande. Les conclusions du chapitre V permettent non seulement de conforter le résultat des mesures empiriques obtenu en chapitre IV, mais aussi d'isoler de façon précise les causes qui sont à l'origine de la propagation du cercle vicieux présenté en première partie.

La troisième et dernière partie est constituée des chapitres VI et VII. Une adaptation de la méthode MRP y est proposée pour améliorer le pilotage des composants liés aux modules optionnels et alternatifs. Dans le chapitre VI, nous proposons une méthode de calcul des besoins basée sur l'utilisation des nomenclatures de planification, fournies par le commerce, permettant d'échapper aux perturbations introduites par le processus de déclinaison de la demande commerciale. L'exploitation statistique des prévisions commerciales, sans passer par toutes les étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale, associée aux mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption par les délais, connus en MRP, permet de piloter l'approvisionnement des composants liés aux modules alternatifs et de transmettre une information utile aux acteurs de la CL-amont. Quelques cas d'application réels sur lesquels cette proposition a été testée sont présentés en chapitre VII.

En conclusion générale, nous listons les conditions de réussite de la proposition et nous évoquons les limites, perspectives d'amélioration et voies de recherche ouvertes par cette thèse.

PREMIÈRE PARTIE

***PILOTAGE DES APPROVISIONNEMENTS EN CL-AMONT :
VERS UN QUESTIONNEMENT DES CAUSES DE L'EFFET
COUP DE FOUET***

CHAPITRE I

CADRE DE LA RECHERCHE ET PROBLÉMATIQUE

Introduction

Ce chapitre¹ a pour objet de fixer le cadre général dans lequel s'est déroulé le travail de recherche. Nous commencerons par présenter le cadre de la recherche et ses objectifs avant de détailler l'organisation autour de laquelle s'est réalisé le travail de recherche. En troisième partie de ce chapitre, nous essayerons de caractériser le contexte industriel et économique de l'industrie automobile qui constitue le cadre pratique de notre étude ; cet exercice est indispensable à la compréhension des problématiques nouvelles auxquelles sont confrontées les industries qui interviennent dans le domaine de la production de masse de produits fortement diversifiés. À la lumière de ces éléments de contexte, nous finirons par situer la problématique, telle que formulée par Renault, qui concerne la maîtrise de la variabilité de la demande et la gestion des approvisionnements en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés.

1. Présentation du cadre de la recherche et définition des objectifs

1.1. Cadre de la recherche

Le travail restitué dans ce document est le résultat des trois années de recherche pour l'obtention du titre de Docteur en Gestion de l'Université Paris Dauphine. Il s'inscrit dans le cadre d'un contrat de recherche entre le constructeur automobile Renault et le laboratoire LAMSADE. La Convention Industrielle de Financement par la REcherche (CIFRE) régie par l'Association Nationale pour la Recherche en Technologie (ANRT), qui a permis la réalisation de cette thèse, a constitué un cadre idéal pour une appropriation efficace du cadre pratique de la recherche et une implication totale dans les projets de réorganisation en relation avec le sujet de thèse.

¹ Dans ce chapitre et les suivants, nous mettons en évidence tout terme nouvellement introduit, correspondant à un concept spécifique utilisé chez Renault, par l'utilisation d'une police *italique en gras*.

Le point de départ de notre recherche consiste en une demande formulée par le Département d'Organisation des Processus (DOP) pour obtenir un éclairage scientifique sur la problématique complexe et récurrente de la variabilité de la demande en CL - amont (demande reproduite en Annexe 1). Rattaché à la Direction de la *Supply Chain* Monde (DSCM), le DOP est l'entité chargée de développer et de standardiser les méthodes de gestion de l'ensemble des processus de la CL à échelle mondiale. Le positionnement, d'un point de vue organisationnel, des travaux de thèse témoigne à la fois du caractère transversal de la problématique et de l'intérêt grandissant porté par Renault sur le sujet de la maîtrise de la variabilité de la demande en CL-amont. Les raisons de cette attention particulière accordée à ce phénomène ainsi que le caractère innovant de la problématique, qui justifie son traitement dans le cadre d'un travail de recherche scientifique, seront évoquées dans le § 3 et le § 4.

Entamée en janvier de l'année 2010, la thèse « Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés » se positionne dans la continuité des travaux de Mendy-Bilek (2007) et Camisullis (2008) réalisés et en collaboration avec Renault dans le domaine de la gestion de la CL.

1.2. Objectifs de la recherche

Tel que présenté par Renault, l'objectif principal de notre travail est de proposer des solutions permettant de maîtriser la variabilité de la demande exprimée par les Usines de Carrosserie et de Montage de véhicules (UCM) vers ses fournisseurs. Les fluctuations de la demande en composants élémentaires et en modules posent un réel problème d'efficacité et d'efficience dans la CL - amont. Elles se traduisent par des ruptures de stocks, des mobilisations de moyens de transports rapides (symptômes d'inefficacité) et des stocks surdimensionnés (symptôme d'inefficience). Ces perturbations, lorsqu'elles se propagent le long de la CL - amont, génèrent une variabilité croissante de la demande prévisionnelle qui pénalise l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Les causes de ce phénomène restent mal connues en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiée.

L'atteinte de l'objectif de maîtrise des fluctuations de la demande en CL - amont passe par plusieurs étapes auxquelles on associe trois objectifs intermédiaires. Le premier objectif est de positionner notre problématique de terrain dans un champ théorique plus large à travers une analyse bibliographique dans le but de capitaliser sur les travaux réalisés et d'en identifier

les potentielles lacunes. Un deuxième objectif consiste à réaliser une étude détaillée des processus d'approvisionnement afin d'identifier les mécanismes qui sont à l'origine de la variabilité de la demande prévisionnelle et de la déformation de la demande commerciale, information de référence en pilotage de la CL-amont. Le dernier objectif est d'apporter des réponses concrètes permettant de maîtriser la variabilité de la demande en CL - amont.

2. Organisation du travail de recherche

L'organisation du travail de recherche est un élément crucial dans le bon déroulement des travaux de thèse. Elle prend encore plus d'importance dans le cadre d'un contrat de recherche entre un partenaire industriel et académique où le rôle de chaque entité doit être clairement défini.

2.1. Instances de gestion et de contrôle

Deux dispositifs ont été mis en place dès le début de la recherche pour informer du niveau d'avancement, valider des résultats intermédiaires et décider de l'orientation future à donner au travail de thèse.

L'instance de gestion s'appuie sur un comité de pilotage interne à l'entreprise constitué du chef du département d'organisation des processus et des intervenants métiers concernés par le projet de thèse. Dans le cadre de cette instance, la restitution se faisait à une double fréquence : mensuelle en comité restreint et trimestrielle en comité élargi avec la présence du directeur de thèse. Une présentation comportant les trois volets : pour information, pour validation et pour décision servait de support de communication au cours de ces échanges. Une lettre d'information sur l'état d'avancement et les orientations décidées était diffusée suite au rendez-vous trimestriel.

L'instance de contrôle, qui s'appuie sur le rôle du directeur de thèse, a eu pour fonction d'apprécier l'état d'avancement, d'alimenter la réflexion et de corriger les dérives. Les rencontres avec le directeur de thèse se faisaient à une fréquence bimensuelle, complétée par des échanges de documents par mail. La restitution, quant à elle, prenait la forme d'un rapport d'activité annuel transmis à l'ANRT et à la Direction de Recherche de Renault.

D'autre part, la pré-soutenance, les congrès, les séminaires et les publications scientifiques ont constitué autant d'occasion de soumettre notre travail de recherche à des comités scientifiques d'évaluation.

2.2. Macro-planning du projet de thèse

Le projet de thèse s'est réalisé sur trois ans selon une logique de concurrence des tâches lorsque les conditions le permettaient. Les principales étapes et jalons du projet sont repris dans le tableau ci-dessous qui présente une vision globale du planning selon un découpage trimestriel du calendrier.

		Trimestre 1 2010	Trimestre 2 2010	Trimestre 3 2010	Trimestre 4 2010	Trimestre 1 2011	Trimestre 2 2011	Trimestre 3 2011	Trimestre 4 2011	Trimestre 1 2012	Trimestre 2 2012	Trimestre 3 2012	Trimestre 4 2012	Trimestre 1 2013	Trimestre 2 2013	Trimestre 3 2013	Trimestre 4 2013		
Principaux jalons			◆	Rapport de recherche bibliographique															
				◆	Rapport d'activité annuel 2010														
									◆	Rapport d'activité annuel 2011									
										◆	Pré-soutenance								
											◆	Mémoire de thèse							
												◆	Soutenance						
Principale étapes	Imprégnation																		
	Recherche bibliographique																		
	Analyse de l'existant																		
	Modélisations / Simulations																		
	Benchmark																		
	Mise en œuvre																		
	Rédaction																		

Tableau I- 1 : Macro- planning du projet de thèse

La recherche bibliographique a été réalisée en plusieurs étapes pour alimenter les rapports d'activités intermédiaires. Ces mêmes rapports ont été exploités pour la rédaction du présent mémoire de thèse.

3. Contexte industriel et économique de la recherche

Le contexte industriel dans lequel se trouve l'industrie automobile résulte d'une évolution des stratégies industrielles et des méthodes de production sur plus d'un siècle. De la production unitaire à la production de masse de produits diversifiés, les modèles de production de la filière automobile n'ont eu de cesse de se transformer et d'inspirer d'autres secteurs de la production de biens. Nous commencerons cette partie en proposant un bref aperçu sur les étapes majeures qui ont marqué l'histoire de l'industrie automobile. Cet exercice a pour but de comprendre l'origine des nouvelles problématiques de gestion liées à la personnalisation de masse.

Dans le § 3.2, nous décrirons le contexte économique particulier dans lequel se trouve actuellement l'industrie automobile. Marqué par une mondialisation galopante et une crise économique majeure, le climat économique qui prévaut présentement permet de mesurer toute l'importance qui est accordée aux problématiques d'optimisation des modèles de gestion des flux en CL - amont.

3.1. De la production unitaire à la production de masse de produits fortement diversifiés

Depuis l'apparition des premiers véhicules particuliers à la fin du XIX^e siècle, l'industrie automobile n'a eu de cesse de s'adapter aux évolutions technologiques, organisationnelles et comportementales des consommateurs. Selon Puig et Collectif Elenbi (2003), quatre phases ont marqué l'évolution des modèles industriels automobiles.

3.1.1. La production unitaire

Apparue avec la naissance de l'automobile, dans ce premier modèle il s'agissait de répondre à des commandes unitaires par le biais de procédés de fabrication artisanaux. L'organisation de la fabrication prenait la forme d'une production en ateliers spécialisés. Du fait des coûts de fabrication élevés, les volumes de fabrication restaient à des niveaux relativement faibles. La maturité technologique de l'industrie automobile ne permettait pas aux premiers constructeurs de proposer de larges gammes de produits à leurs clients ; bien souvent, les marques automobiles étaient associées au seul modèle de voiture qu'elles proposaient à leurs clients.

3.1.2. La production de masse standardisée

La démocratisation de l'automobile est survenue suite au remplacement des organisations en ateliers spécialisés, fonctionnant selon le principe du *job shop*, par des systèmes de montage à la chaîne en réponse aux besoins croissants de consommation des ménages dans les pays industrialisés. La rentabilité de la construction automobile passait par la standardisation des procédés de fabrication et la réalisation d'économies d'échelle grâce aux volumes de production, ce qui a eu pour conséquence de limiter la variété des produits finis proposés à la vente. En passant d'une production unitaire à une production de masse de produits standardisés, la stratégie industrielle s'inverse : d'une production tirée par la demande, on passe à une production poussée vers un stock à partir duquel sont servis les clients. La fameuse Ford-T du constructeur américain symbolise parfaitement cette évolution.

3.1.3. La production de masse diversifiée

C'est une phase transitoire durant laquelle l'offre en termes de diversité a augmenté pour aller au plus près des préférences des clients. La diversité était assurée grâce à un portefeuille de produits élargi. Plusieurs gammes de produits étaient proposées aux clients, mais l'offre au sein d'une même gamme restait restreinte. Cette stratégie a été adoptée par GM à travers sa panoplie de marques pour contrer l'hégémonie de Ford sur le marché américain. Du point de vue de la gestion des flux, on restait sur des approches de flux poussés avec la nécessité de suivre les évolutions et tendances du marché par rapport à l'offre disponible.

3.1.4. La personnalisation de masse

La production de masse de produits fortement diversifiés est apparue dans les années soixante-dix pour répondre à un besoin de personnalisation des produits de large consommation. La personnalisation, initialement réservée à la seule production unitaire par une conception à la commande, s'est généralisée à la production de masse et s'est imposée dans certains secteurs d'activité comme un facteur de compétitivité incontournable. L'industrie automobile fait partie de ces secteurs où la personnalisation de masse est devenue la norme. L'évolution des habitudes de consommation d'une part, et les progrès technologiques, organisationnels et managériaux réalisés depuis le fordisme d'une autre part, ont favorisé l'émergence de ce nouveau modèle industriel. Da Silveira et al. (2001) associent l'émergence de la personnalisation de masse au développement de la flexibilité des outils de

production et des technologies de l'information. De nos jours, la possibilité pour un client de configurer son futur véhicule est utilisée par les constructeurs automobiles comme un argument de vente au même titre que le prix, la qualité ou le délai de mise à disposition.

Désormais, les clients ont la possibilité de faire un grand nombre de choix quant aux options, équipements et motorisation de leur futur véhicule. L'augmentation de la diversité des produits finis a fondamentalement modifié les règles de gestion en vigueur ; la production pour stock a peu à peu laissé place à une production à la commande. Il est en effet devenu inconcevable de disposer en stock de produits finis couvrant toute la diversité possible. La nécessité d'adapter les systèmes industriels et logistiques à ces nouvelles contraintes a vu apparaître le modèle d'assemblage à la commande, aujourd'hui largement répondu dans le secteur automobile. Cette nouvelle stratégie vise à apporter une réponse au principal enjeu de la production de masse de produits fortement diversifiés : rendre compatible la gestion d'un large portefeuille de produits finis avec le raccourcissement du délai commercial et la nécessité de maîtriser les coûts de production et de conception.

L'assemblage à la commande repose sur une architecture modulaire des véhicules qui permet d'obtenir une grande variété de produits finis grâce à un assemblage de modules alternatifs interchangeables, chacun remplissant une fonction particulière dans le fonctionnement du produit fini. L'interchangeabilité suppose de standardiser non pas les modules mais les interfaces entre modules (Lamothe et Aldanondo, 2001). Le produit fini est vu alors comme une des nombreuses combinaisons possibles de modules alternatifs ; on parle alors de modularité combinatoire (Salvador et al., 2002). La conception modulaire assure la cohérence technique d'éléments susceptibles d'être assemblés et de partager un large spectre de contraintes (électriques, mécaniques, etc.). Cette approche est efficace du point de vue de la production car elle permet d'obtenir la variété désirée sur des lignes d'assemblage dans lesquels la variabilité du temps de travail de postes assurant le montage de composants alternatifs est faible, voire nulle (Giard, 2003).

Du point de vue des approvisionnements, le succès d'une stratégie d'assemblage à la commande repose sur l'hypothèse d'une disponibilité immédiate des composants et modules, nécessaire à l'assemblage d'un véhicule commandé. Afin de minimiser les coûts d'immobilisation, induits par la mise en stock des modules et composants, cette exigence a longtemps été satisfaite grâce à une grande proximité géographique du réseau de fournisseur. La philosophie du juste-à-temps a poussé les modèles de gestion des flux vers cette voie en faisant reculer le plus en amont possible le PPC. Le développement des technologies de

l'information a permis de concrétiser ces stratégies à travers les modèles de production et d'approvisionnement synchrone et de *kanban*.

Pour rentrer dans l'ère de la personnalisation de masse, Renault s'est engagée dans une refonte profonde de sa stratégie commerciale et industrielle à travers le projet *Nouvelle Distribution* (Cf. Figure I- 1).

Lancé en 1997, l'ambition de ce projet était de fabriquer 70 % des véhicules à la commande contre 30 % avant le projet, tout en raccourcissant le délai commercial de livraison (Souilah, 2008). Pour rendre compatible l'offre croissante de diversité de produits finis avec un délai commercial limité à deux semaines, il a fallu réduire les délais d'obtention des composants et modules rentrant dans la fabrication des véhicules en favorisant un réseau de fournisseur à proximité des usines d'assemblage et en développant les modèles d'approvisionnement en juste à temps.

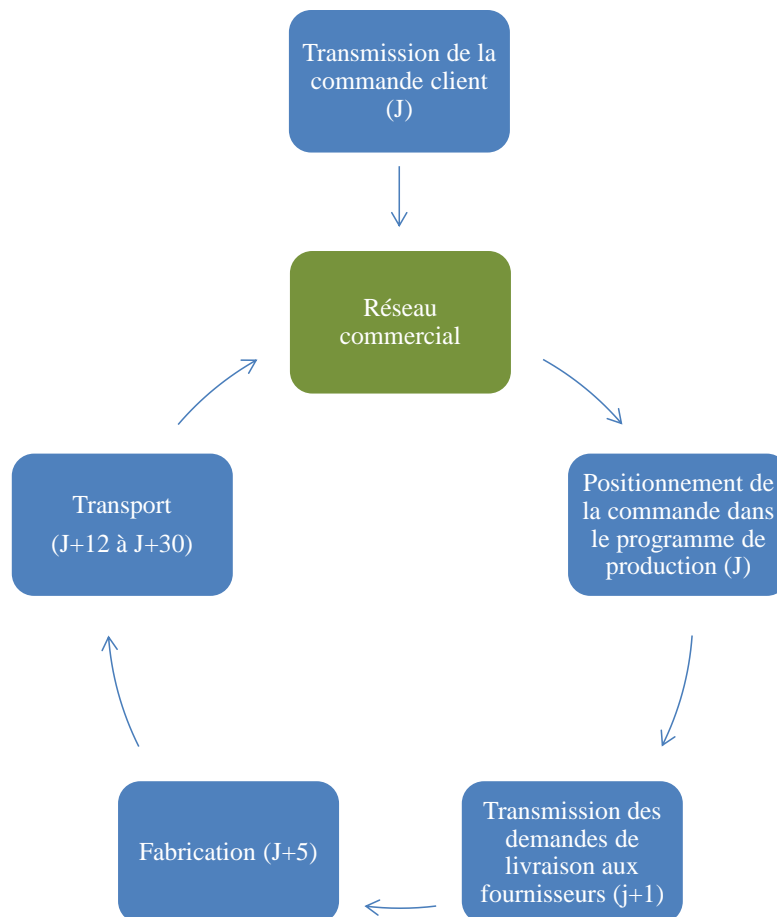


Figure I- 1 : Nouvelle distribution (Souilah, 2008)

La synchronisation et l'accélération des flux-amont et des flux-aval se sont rapidement confrontées aux conséquences de la mondialisation qui a vu à la fois les fournisseurs et les

constructeurs automobiles se localiser dans des régions à faible coût de production. Cette tendance, qui s'est accentuée ces dernières années, a conduit les délais de livraison entre clients et fournisseurs à s'étirer jusqu'à parfois atteindre plusieurs mois. Cette nouvelle donne économique remet en cause les schémas établis par la nouvelle distribution. Les quelques jours du carnet de commande ne suffisent plus à fournir l'information suffisante pour gérer les approvisionnements. Pour honorer le délai commercial affiché, dans des conditions économiques raisonnables, il devient nécessaire d'adapter les modèles de gestion des approvisionnements pour tenir compte de l'hétérogénéité des délais d'obtention des composants et modules auprès des fournisseurs. Une information prévisionnelle de nature différente, autre que celle qui est connue avec certitude et qui provient des carnets de commande, doit être exploitée afin de garantir la disponibilité des pièces et modules en temps voulu pour l'assemblage final. Une utilisation inopportune des prévisions peut conduire à des perturbations qui se propagent le long de la CL - amont, similaires à un ECF.

3.2. Contexte économique de l'industrie automobile

Le mouvement de mondialisation a considérablement modifié le paysage économique en général et celui de l'industrie automobile en particulier. La saturation des bassins de consommation traditionnels, que constituent les pays occidentaux, a poussé les constructeurs automobiles à s'orienter vers les nouveaux marchés des pays émergents en forte croissance. L'exportation, concurrencée par des incitations douanières et fiscales à l'investissement dans certains pays, a laissé place à une stratégie de production locale pour satisfaire les besoins d'un marché régional (Cf. Annexe 2). La course à la conquête de nouveaux marchés par une implantation industrielle à échelle planétaire s'est matérialisée par une mondialisation des flux en CL - amont ; l'accroissement des flux d'approvisionnement maritimes en est une conséquence concrète. Du côté des fournisseurs, la force d'attraction, qui pousse de plus en plus les équipementiers à s'orienter vers une production délocalisée, est celle des coûts de production. La pression sur les coûts d'achat, exercée par les constructeurs automobiles, et la forte concurrence entre fournisseurs encouragent ces derniers à localiser leur production dans les pays à faible coût de production.

Deux remarques peuvent être faites sur ce double phénomène qui pousse, d'une part les constructeurs à se rapprocher des marchés en forte croissance, et d'autre part les fournisseurs à produire dans des zones à faibles coûts. Premièrement, les constructeurs et les fournisseurs ne s'orientent pas forcément vers les mêmes zones géographiques. Dans le cas inverse, il

existe un temps de latence qui sépare l'installation d'une usine d'assemblage de véhicules et l'atteinte d'un taux d'intégration¹ désiré. Ce premier effet a pour conséquence d'exacerber la tendance à allonger les délais d'obtention des composants. Deuxièmement, la pression sur les coûts d'achat des composants dénote une tendance à l'optimisation locale de la part de certains constructeurs en occultant les coûts induits par un allongement des délais d'approvisionnement. Renault tente de corriger ce problème à travers un projet d'optimisation du coût total à la livraison.

La crise économique, qui a fortement affecté le secteur automobile en Europe et en Amérique du Nord, a encouragé les groupes industriels à poursuivre leurs efforts d'internationalisation en favorisant des investissements dans les zones à forte croissance que sont l'Asie et l'Amérique du Sud. Renault a vu ainsi ses ventes et sa production réalisées en dehors de l'Europe passer de 25 % à près de 50 % en l'espace d'une décennie avec une accélération notable de cette tendance depuis 2008 (Cf. Figure I- 2). D'un autre côté, la difficulté à trouver des financements et la nécessité de réduire les endettements consentis en période de crise conduisent les entreprises du secteur automobile à renforcer le contrôle du solde de trésorerie disponible après avoir financé les investissements par les activités courantes d'exploitation (Dauphine Recherches en Management, 2010). La maîtrise des flux de trésorerie passe, entre autre, par la réduction des stocks immobilisés. La gestion des approvisionnements et des stocks doit à la fois s'adapter à une modification structurelle des flux-amont et à la nécessité de calibrer les stocks au plus juste.

¹ Fait référence au taux, en nombre ou en valeur, de pièces approvisionnées localement auprès des fournisseurs de premier rang. La durée nécessaire à l'atteinte d'un taux d'intégration cible dépend du niveau de maturité du secteur industriel local. Dans certains pays en voie de développement, le tissu industriel de fournisseur automobile est inexistant.

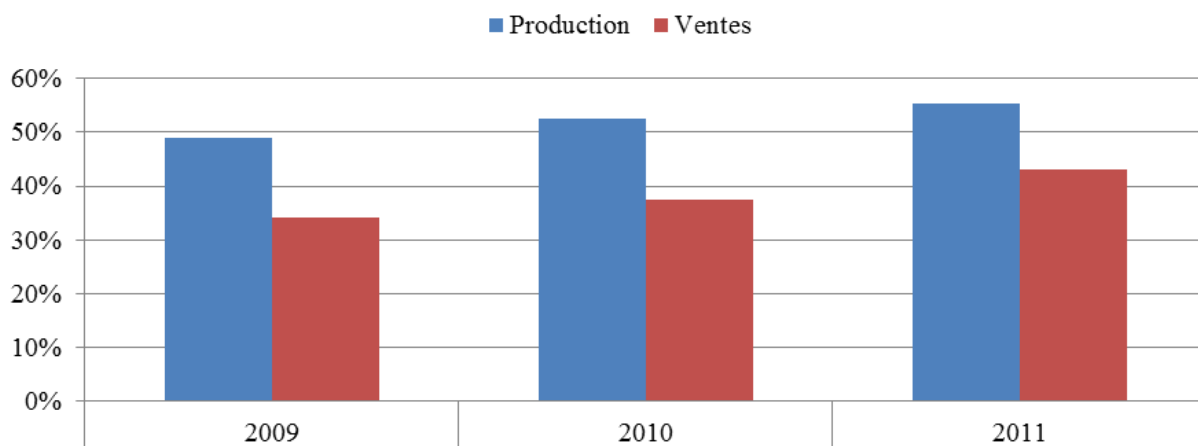


Figure I- 2 : Pourcentage des ventes et de la production du groupe Renault réalisées hors Europe entre 2009 et 2011 (Renault S.A., 2010) (Renault S.A., 2011)

4. Problématique de la gestion des approvisionnements en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés

La gestion des approvisionnements en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés est confrontée à diverses contraintes qui rendent difficile l'atteinte de l'objectif des entreprises évoluant dans ce secteur : offrir une gamme de produits finis de plus en plus large avec des délais de mise à disposition de plus en plus courts. La grande diversité de produits finis proposée associée à un rétrécissement du délai commercial admissible en aval et à un allongement des délais d'approvisionnement en amont, conséquence d'une mondialisation des flux, rend l'application, sans adaptation préalable, des méthodes de planification classiquement utilisées en assemblage à la commande non-satisfaisante du point de vue de leur aptitude à garantir un niveau de service cible à moindre coût.

La concurrence par les délais de mise à disposition de produits finis (mais aussi de remplacement de gamme), s'ajoutant à l'exigence d'une très grande variété de produits finis, a conduit les industriels à généraliser, dans le renouvellement de leurs gammes, l'usage de la conception modulaire de composants alternatifs ou optionnels. La conception modulaire passe par la standardisation de support de montage et la standardisation des interfaces physiques entre modules et/ou support de montage de ces modules (Giard, 2003). La diversité obtenue augmente de manière exponentielle avec le nombre de modules alternatifs ; à tel point que, le plus souvent, le nombre de produits finis différents pouvant être obtenus dépasse largement le nombre de ces produits commercialisés sur une longue période pouvant correspondre à la

durée du cycle de vie de la gamme de produits. De ce fait, l'assemblage à la commande s'impose comme le système productif le mieux adapté au modèle de production de masse de produits fortement diversifiés. Pour satisfaire la contrainte du délai commercial court de livraison au client, l'assemblage à la commande implique une disponibilité presque immédiate de l'ensemble des composants et modules montés sur la ligne d'assemblage. La complexité et la richesse des nomenclatures de produit rendent nécessaire la mise en place de méthodes de pilotage des flux s'appuyant sur des concepts et mécanismes qui sont au cœur du *Material Requirement Planning* (MRP) pour traiter de façon automatisée un nombre important de données en mobilisant des règles de calcul simples pour l'ensemble des acteurs de la CL - amont. La démarche MRP s'appuie fondamentalement sur le double mécanisme d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais. Le mécanisme d'explosion amène peu de commentaires. Celui de l'absorption conduit à faire dépendre lesancements en production de composants à des réquisitions datées exprimées dans le Programme Directeur de Production (PDP). L'allongement des délais d'approvisionnement en la CL - amont implique une anticipation des besoins futurs pour l'ensemble de ces éléments.

Les besoins anticipés, lorsqu'ils sont déduits de prévisions qui se situent au-delà de l'horizon gelé, doivent faire l'objet d'un traitement particulier puisqu'ils sont susceptibles d'être modifiées au cours du temps et donc de générer des surstocks lorsque la demande est revue à la baisse avant de « rentrer dans l'horizon gelé » ou des ruptures de stock lorsque la demande est revue à la hausse. Ces perturbations se répondent en cascade le long de la CL - amont générant des effets similaires à l'ECF observé en CL - aval.

Le sujet proposé par Renault peut être reformulé et intégré dans une classe de problématiques plus large qui concerne le mode d'exploitation et de partage de l'information prévisionnelle garantissant l'efficacité et l'efficience des approvisionnements dans un modèle de production de masse de produits fortement diversifiés.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les objectifs de notre travail de recherche et décrit l'organisation sur laquelle nous nous sommes appuyés pour les atteindre. Les contextes économiques et industriels particuliers, qui caractérisent l'environnement dans lequel nous avons mené nos travaux, appellent à la mise au point de méthodes adaptées à la réalité du terrain et répondant aux exigences de performance économique.

Notre problématique consiste à élaborer une approche efficace et efficiente de pilotage des flux-amont pour la maîtrise de la variabilité de la demande exprimée par les UCM de Renault. Dans le contexte particulier de la production de masse de produits fortement diversifiés, confrontée à une dispersion géographique des unités productives, la maîtrise des fluctuations de la demande passe par une exploitation et un partage judicieux de l'information prévisionnelle. Dans le chapitre II, nous proposerons une grille d'analyse permettant de positionner les travaux réalisés dans les domaines du partage d'informations et de l'étude des fluctuations de la demande en CL. Cet exercice nous permettra de mettre en évidence les lacunes persistantes dans la littérature spécialisée et de recenser les résultats exploitables pour notre travail de recherche. À la fin de ce chapitre, nous positionnerons notre problématique par rapport à la grille d'analyse retenue.

CHAPITRE II

L'ECF ET LE PARTAGE D'INFORMATIONS DANS LA CL : UNE LITTÉRATURE CONTINGENTE

Introduction

L'effet coût de fouet correspond au phénomène d'amplification croissante de la variabilité de la demande en remontant le long de la CL de l'aval vers l'amont. Il fait l'objet d'une attention soutenue par les chercheurs depuis une quinzaine d'années et préoccupe les gestionnaires de la CL parce qu'il est une cause importante de perte de performance. Le partage d'informations entre acteurs de la CL est généralement considéré comme l'un des principaux moyens de réduction de l'ECF. Une cinquantaine d'articles portant sur ces thèmes et parus dans les revues considérées comme majeures ont été étudiés. Les grilles d'analyse utilisées permettent de mettre en évidence le caractère très contingent de nombreuses conclusions et l'existence de lacunes importantes dans les investigations conduites, notamment en ce qui concerne l'ECF en CL-amont.

L'appellation « effet coup de fouet » ou « *Bullwhip Effect* » a été popularisée par Lee et al. (1997) suite à une étude réalisée sur la demande de couches bébé chez *Procter & Gamble*. L'un des premiers documents décrivant ce phénomène remonte à 1961 (Forrester, 1961). *J.W. Forester*, l'auteur de ce document, en voit l'origine dans l'irrationalité des comportements des acteurs de la CL. Pour les auteurs qui se sont intéressés à l'ECF depuis la fin des années 1980, la cause est plutôt à trouver dans les interactions qui existent entre ces mêmes acteurs dont le comportement est considéré comme rationnel et optimisé localement. Une analyse approfondie de la littérature publiée depuis l'article de Lee et al. (1997) révèle des lacunes dans l'investigation conduite, qui se focalise essentiellement sur l'aval de la CL, et le caractère contingent de nombreuses conclusions.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une synthèse des recherches récentes menées dans les domaines du partage d'information et de l'ECF à travers la construction d'une grille d'analyse. Cette grille doit nous permettre d'identifier les articles potentiellement exploitables pour le traitement de notre problématique, de repérer les lacunes et le caractère contingent de

certaines études et enfin de positionner notre travail par rapport aux contributions existantes dans la littérature spécialisée.

1. Méthodologie d'analyse de la littérature

Lors de notre investigation, nous ne nous sommes pas limités aux seuls articles explicitement dédiés à l'ECF car le partage d'informations entre acteurs de la CL, dans son rôle d'inhibiteur d'ECF, a rapidement focalisé l'attention des chercheurs depuis l'article de Lee et al. (1997) qui a été l'un des premiers à proposer cette piste ; plusieurs articles importants pour le pilotage de la CL ne font pas explicitement référence à l'ECF qui reste néanmoins présent en toile de fond.

Dans notre processus de sélection d'articles, nous avons commencé par lister les mots clés en lien avec les thèmes ciblés à savoir l'ECF et le partage d'informations en CL. Une recherche par mot clé sur les bases documentaires de gestion nous a permis de constituer une première base d'article qu'on a enrichie, au fur et à mesure des lectures, par des références citées en bibliographie des articles consultés. Parmi la centaine d'articles recensés, un ensemble de 53 articles, publiés entre 1997 et 2011, a été sélectionné essentiellement dans les revues majeures du classement CNRS (Cf. Tableau II- 1). Les articles non sélectionnés ont été mis à l'écart, après lecture, car jugés trop éloignés de notre champ de recherche. L'analyse des 53 articles sélectionnés est synthétisée dans le Tableau II- 2.

Article	N°	Article	N°	Article	N°	Article	N°
(Agrawal et al., 2009)	[1]	(Childerhouse et al., 2008)	[15]	(Lee et al., 1997)	[29]	(Sucky, 2009)	[43]
(Bailey et Francis, 2008)	[2]	(Croson et Donohue, 2005)	[16]	(Lee et al., 2004a)	[30]	(Thonemann, 2002)	[44]
(Balan et al., 2009)	[3]	(Dejonckheere et al., 2002)	[17]	(Lee et al., 2004b)	[31]	(Viswanathan et al., 2007)	[45]
(Bayraktar et al., 2008)	[4]	(Dejonckheere et al., 2003)	[18]	(Li et Gao, 2008a)	[32]	(Wang et al., 2005)	[46]
(Ben-Tal et al., 2009)	[5]	(Dejonckheere et al., 2004)	[19]	(Li et Zhang, 2008b)	[33]	(Wangphanich et al., 2010)	[47]
(Bolarín et al., 2009)	[6]	(Disney et Towill, 2003)	[20]	(Liu et al., 2009)	[34]	(Wong et al., 2009)	[48]
(Cachon et Fisher, 2000)	[7]	(Ertunga et Metin, 2009)	[21]	(Moinzadeh, 2002)	[35]	(Wright et Yuan, 2008)	[49]
(Cachon et Larivière, 2001)	[8]	(Ganesh et al., 2007)	[22]	(Nienhaus et al., 2006)	[36]	(Wu et Cheng, 2008)	[50]
(Cachon et al., 2007)	[9]	(Geary et al., 2006)	[23]	(O'Donnell et al., 2009)	[37]	(Yee, 2005)	[51]
(Chan et al., 2004)	[10]	(Huang et al., 2005a)	[24]	(Ouyang, 2007)	[38]	(Zhang, 2004)	[52]
(Chatfield et al., 2004)	[11]	(Huang et al., 2005b)	[25]	(Ouyang et Li, 2010)	[39]	(Zhao et Xie, 2002)	[53]
(Chen et al., 2006)	[12]	(Jung et al., 2007)	[26]	(Pereira et al., 2009)	[40]		
(Chen et Lee, 2009)	[13]	(Kelepouris et al., 2007)	[27]	(Ryu et al., 2009)	[41]		
(Cheng, 2009)	[14]	(Lau et al., 2004)	[28]	(Springer et Kim, 2010)	[42]		

Tableau II- 1 : Liste des articles sélectionnés pour la revue de littérature

Lors de notre recherche bibliographique, nous nous sommes intéressés aux revues de littératures proposant des grilles d'analyse des travaux réalisés dans les domaines de l'ECF et du partage d'informations en CL. Deux de ces revues de littératures sont particulièrement intéressantes. Celle de Huang et al. (2003) réalise une classification de deux cent articles

portant sur le partage d'informations dans la CL selon sept angles de vue (structure de la CL, niveau de décision, nature de l'information partagée, mode de partage d'informations, évaluation de la performance, technique de modélisation, méthode d'analyse des effets sur la performance de la CL). Ketzenberg et al. (2006) se proposent d'identifier les déterminants de la valeur de l'information partagée à travers l'analyse des conclusions apportées par vingt-sept articles ; la valeur de l'information partagée est appréhendée à travers l'objectif de performance recherché et les caractéristiques de la CL étudiée. Notre analyse s'inspire de celle de Huang et al. (2003) qu'elle complète à la fois par la prise en compte des articles publiés depuis 2002 et par la prise en compte de nouvelles dimensions importantes pour l'analyse de l'ECF dans la CL – amont.

Articles ¹	Domaine traité																																						
	Partage d'informations	Descriptif	Prescriptif	Stratégique	Tactique	Opérationnel	Dyadique	Série	Divergent	Convergent	Réseau	Standardisé	ECF	Partage d'informations	Descriptif	Prescriptif	Stratégique	Tactique	Opérationnel	Dyadique	Série	Divergent	Convergent	Réseau	Standardisé	ECF	Partage d'informations	Descriptif	Prescriptif	Stratégique	Tactique	Opérationnel	Dyadique	Série	Divergent	Convergent	Réseau		
[1]	X	X	X	X	X	X	X					X		X	X	X	X				X					X													
[2]	X	X	X		X			X				X		X	X	X					X					X													X
[3]	X	X	X	X	X	X	X					X		X	X	X										X													X
[4]	X	X	X	X	X							X		X	X	X					X			X		X													X
[5]	X	X	X	X		X		X				X		X	X	X					X					X													X
[6]	X	X	X	X	X			X				X		X	X	X					X					X													
[7]	X	X	X	X	X	X		X				X		X	X	X					X			X		X												X	
[8]	X	X	X	X	X	X		X				X		X	X	X					X					X													X
[9]	X	X				X		X	X	X		X	X	X	X										X	X												X	
[10]	X	X	X					X	X			X		X	X					X			X			X	X												X
[11]	X	X	X	X	X	X		X				X		X	X	X					X			X		X												X	X
[12]	X	X	X	X	X	X		X				X		X	X	X					X					X	X												X
[13]	X	X	X	X	X	X		X				X		X	X	X					X			X		X	X												X
[14]	X	X	X	X	X			X				X		X	X	X					X			X	X														X
[15]	X	X	X			X		X	X			X		X	X	X					X			X	X														X
[16]	X	X	X	X	X	X		X				X		X	X	X					X			X		X													X
[17]	X		X	X	X	X		X				X		X	X	X					X			X		X													X
[18]	X		X	X	X	X		X				X		X	X	X					X			X		X													X
[19]	X	X	X	X		X		X				X		X	X	X					X			X		X													X

¹ Les sources bibliographiques associées aux numéros d'articles sont listées dans le Tableau II- 1.

CHAPITRE II. L'ECF ET LE PARTAGE D'INFORMATIONS DANS LA CL : UNE LITTÉRATURE CONTINGENTE

Articles	Domaine traité		Type de décision	Structure de la CL	Type de produits finis	Position du flux dans la CL	Modélisation de la demande	Modèle de commande	Causes de l'ECF	Information partagée	Modélisation	Mesure de la performance	Analyse de l'impact
	ECF	Partage d'informations											
[20]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[21]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[22]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[23]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[24]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[25]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[26]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[27]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[28]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[29]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[30]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[31]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[32]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[33]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[34]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[35]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[36]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[37]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[38]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[39]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[40]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[41]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[42]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[43]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[44]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[45]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[46]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[47]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[48]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[49]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[50]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[51]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[52]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
[53]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau II- 2 : Analyse de la littérature sur l'ECF et l'échange d'informations en CL

Les axes d'analyse retenus, suite à une lecture exhaustive des articles, sont au nombre de 12. Un axe se définit par une liste d'items appartenant à un ensemble susceptible de différencier de manière pertinente les articles étudiés. Cet ensemble peut être composé d'items exclusifs, ce qui n'exclut pas qu'un article puisse mobiliser successivement plusieurs

de ces items. On peut citer, par exemple, la décomposition d'une CL entre sa partie productive et sa partie distributive (CL-amont et CL-aval). Cet ensemble peut aussi être composé d'items non exclusifs, un article mobilisant généralement plus d'un item. Dans cette catégorie, on trouve, par exemple, la liste des causes identifiées de l'ECF ou celle des solutions proposées pour l'atténuer.

De l'analyse de cette base d'articles, conduite dans le §2, on peut tirer un certain nombre de conclusions sur le caractère contingent de certaines conclusions avancées et sur les recherches complémentaires à mener pour mieux comprendre et maîtriser l'ECF dans certaines situations particulières.

2. Analyse de la littérature

2.1. Axe 1 : Objectif de l'article

Cet axe distingue les études descriptives, des études prescriptives, sachant que certains articles font suivre une partie descriptive, d'une partie prescriptive.

L'apparition relativement récente de l'ECF dans la littérature spécialisée fait que bon nombre d'articles, dont l'objet est en relation avec l'ECF, se penchent plutôt sur la description et l'explication de ce phénomène avec souvent des perceptions différentes. Lee et al. (1997) montrent l'existence d'une variabilité croissante de la demande en s'éloignant du client final malgré un comportement rationnel des acteurs de la CL ; ils associent l'existence de ce phénomène à quatre causes principales : la mise à jour des prévisions de la demande, les politiques de lotissement, l'anticipation des pénuries et la variation des prix. D'autres articles se sont intéressés à la manière de quantifier ce phénomène comme dans l'article de Ouyang et Li (2010), où les auteurs proposent un modèle général d'identification et d'évaluation de l'ECF.

Les études prescriptives s'intéressent, quant à elles, à la manière de contrer une ou plusieurs des causes de l'ECF identifiées dans les études explicatives. Dans les articles de Wright et Yuan (2008) et de Bayraktar et al. (2008), des modèles de prévisions sont proposés pour réduire l'ECF. Agrawal et al. (2009) et Chatfield et al. (2004) proposent respectivement de réduire les délais de réapprovisionnement et de minimiser leur variation afin de limiter les perturbations croissantes de la commande le long de la CL. Poursuivant le même but, d'autres articles, comme ceux de Chen et Lee (2009) et de Springer et Kim (2010), proposent

d'adapter les politiques de réapprovisionnement. De manière générale, les articles dont l'objet est en relation avec le partage d'informations ont une orientation plutôt portée sur la prescription car ils privilégient le partage d'informations comme solution d'amélioration de la performance de la CL en général et de réduction de l'ECF en particulier.

2.2. Axe 2 : Type de décision

Cet axe ne concerne que les articles prescriptifs. La typologie proposée par Anthony (1965), distinguant les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles, est retenue ici pour regrouper les propositions formulées pour améliorer les pratiques de gestion de la CL. Les décisions stratégiques concernent l'allocation des flux et celles des capacités. Les décisions tactiques traitent de la planification de la production, de la coordination de la CL, des politiques de réapprovisionnements et de la localisation et du dimensionnement des stocks. Les décisions opérationnelles traitent du transport et du lancement en production et approvisionnement.

Les articles plus centrés sur le partage d'informations font des propositions visant à améliorer la coordination de la CL. Cachon et Fisher (2000) préconisent une accélération des flux d'informations pour améliorer l'efficacité d'une CL de distribution et y réduire l'ECF. Chen et al. (2006) proposent de contractualiser la notion de risque entre client et fournisseur pour améliorer le profit global des acteurs de la CL. Ganesh et al. (2007) établissent des règles de décisions quant au niveau de partage d'informations à instaurer entre grossiste et détaillant en fonction de la substituabilité des produits finis. Pour réduire l'ECF, Croson et Donohue (2005) préconisent l'utilisation de politiques de réapprovisionnement différentes en fonction de la position du flux dans une CL en série.

2.3. Axe 3 : Structure de la CL

La structure de la CL se définit par l'agencement des différents maillons d'une CL. Elle est représentable par un graphe où les sommets représentent les unités de production, de stockage ou de vente, et les arcs, les flux physiques et informationnels reliant ces mêmes unités. Cette structure contraint la circulation des flux de biens et d'informations et conditionne la complexité des représentations, modélisations et instrumentations mobilisables mais aussi la validité des descriptions et prescriptions. Cinq structures sont habituellement retenues pour représenter la CL.

- Structure dyadique : cette structure simple relie un client unique à un fournisseur unique.
- Structure en série : cette structure est obtenue par la concaténation de plusieurs structures dyadiques, dans laquelle un maillon a au plus un client et au plus un fournisseur. Elle correspond généralement à tout ou partie de la séquence simplifiée suivante : fournisseur→ fabricant→ grossiste→ détaillant→ client final.
- Structure divergente : cette structure arborescente est souvent utilisée pour modéliser les réseaux de distribution à partir d'une usine de fabrication. Dans cette configuration, un maillon est le client d'un unique maillon et le fournisseur de plusieurs maillons, le premier maillon pouvant correspondre à l'usine de fabrication des produits finis.
- Structure convergente : cette structure arborescente, symétrique de la précédente, est généralement utilisée pour modéliser la partie productive d'une CL où un maillon est le fournisseur d'un seul maillon et le client de plusieurs maillons, le dernier maillon correspondant à l'usine de fabrication des produits finis.
- Structure en réseau : c'est le graphe le plus complexe dans laquelle un maillon peut être fournisseur de plusieurs maillons et clients de plusieurs autres maillons ; *a priori* ce graphe est sans cycle. Cette structure est la seule susceptible de décrire correctement les grandes CLs mondiales.

Une grande majorité des articles s'intéresse à des structures dyadiques. Beaucoup d'auteurs retiennent cette configuration pour construire leurs modèles en partant du principe que la structure dyadique est la composante élémentaire de toute autre configuration. Ce postulat n'est valide que sous certaines conditions de découplage des flux en entrée et en sortie d'un maillon de la CL excluant ainsi la problématique de mutualisation.

La structure en série est utilisée lorsque l'extrapolation de résultats obtenus sur des modèles simples à deux échelons n'est pas triviale. L'utilisation de cette structure, au même titre que la structure à deux échelons, ne peut être pertinente que dans le cas d'une gestion exclusive des commandes d'un client par un et un seul fournisseur. Cette hypothèse a son importance car elle réduit considérablement les conséquences que peut avoir la mutualisation sur l'ECF et sur la valeur de l'information partagée. Traditionnellement, le phénomène de l'ECF est traité sur des CLs en série qui permettent de mettre en évidence la propagation des perturbations en remontant vers l'amont. Nienhaus et al.(2006) et O'Donnell et al. (2009) utilisent la structure en série du jeu de la bière pour analyser respectivement l'influence du comportement humain et le rôle des politiques de commande sur l'ECF.

La structure divergente permet de modéliser des CLs de distribution où plusieurs détaillants s'approvisionnent auprès d'un même grossiste. En cas de partage d'informations, celle-ci se retrouve centralisée en un seul point. Cette caractéristique des CLs divergentes permet la mise en place de stratégies de gestion des approvisionnements basés sur le partage d'informations telles que la gestion partagée des approvisionnements (*Vendor Management Inventory*). Wong et al. (2009) présentent cette stratégie comme un moyen pour réduire l'ECF.

Parmi les articles consultés, aucune recherche ne s'est intéressée aux structures divergentes où des unités finales productives s'approvisionnent auprès de fournisseurs communs. En CL-amont, la configuration divergente fait intervenir des phénomènes de mutualisation peu enclins à un traitement analytiques.

Les structures convergentes et en réseau restent peu abordées car relativement complexes à étudier par rapport aux autres configurations. En CL - amont, la structure convergente, qui associe à un même client plusieurs fournisseurs, fait intervenir la nomenclature des produits finis qui, selon la diversité, introduit un niveau de difficulté supplémentaire dans le pilotage de la CL-amont.

Tous les articles consultés, à quelques exceptions près, considèrent des CLs à deux échelons ou en série. Ces deux structures sont particulièrement bien adaptées à l'étude de l'ECF qui, par définition, est le rapport entre une variabilité de demande en aval et une variabilité de la commande en amont. Néanmoins, certains auteurs se sont intéressés à l'ECF dans des structures plus complexes considérant que l'architecture de la CL peut avoir son importance dans l'explication du phénomène. Sucky (2009) met en évidence des phénomènes de compensation atténuant l'ECF dans une structure divergente lorsqu'on remonte vers les maillons de la racine.

2.4. Axe 4 : Type de produits finis

Les produits finis sont les objets échangés par les maillons d'une CL - aval. Pour leur fabrication, les maillons productifs utilisent des modules, composants et matières premières, eux-mêmes échangés entre les maillons de la CL - amont. Le dernier chaînon productif représente la frontière entre CL - amont, à laquelle il appartient, et CL - aval.

L'ECF dans la CL - amont fait intervenir, en plus des problématiques identifiées dans la CL - aval, toute une série de phénomènes potentiellement perturbateurs, liés aux décisions de

production. Dans la CL - aval, dédiée à la distribution des produits finis, la réaction à une commande est potentiellement immédiate puisqu'il s'agit d'une modification de localisation de produits, différée en général pour des raisons de bonne gestion logistique. L'allocation des ressources productives, l'ordonnancement de la production et les approvisionnements sont des décisions spécifiques à la CL - amont, conditionnés par les délais de fabrication et qui s'ajoutent aux décisions déjà identifiées pour la CL - aval.

En production de masse, la diversité des produits finis est obtenue par combinaison de modules alternatifs ou optionnels qui peuvent partager des composants communs sans que ceux-ci aient des coefficients de nomenclatures identiques. Le mécanisme d'explosion des nomenclatures associé à celui de l'absorption des délais complique singulièrement la gestion des approvisionnements de la CL - amont et rend inutiles la plupart des préconisations de partage d'informations relatives à la demande finale. En s'intéressant à l'ECF dans l'industrie automobile, Childerhouse et al. (2008) illustrent, à travers un diagramme de causes à effets, comment une gestion inadéquate des approvisionnements alimente un cercle vicieux qui propage des perturbations d'amplitudes croissantes le long de la chaîne logistique amont.

La quasi-totalité des articles consultés s'intéressent à la production de masse de produits standardisés. Dans le jeu de la bière, repris comme modèle d'analyse de l'ECF par bon nombre d'auteurs comme Nienhaus et al. (2006) et O'Donnell et al. (2009), seul un produit est échangé entre les acteurs de la CL. Pour démontrer l'intérêt de contractualiser le partage d'informations, Cachon et Lariviere (2001) considèrent un composant unique rentrant dans la composition d'un seul produit fini. D'autres auteurs comme Ganesh et al. (2007) et Li et Zhang (2008b) s'intéressent aux effets de la substituabilité entre plusieurs produits finis sur la valeur de l'information partagée ; la diversité traitée dans ces articles reste très limitée comparée à celle obtenue par combinaison de modules alternatifs et optionnels.

Dans l'article de Yee (2005), il est question de produits diversifiés obtenus par combinaison de modules alternatifs ou optionnels. L'auteur ne s'attarde pas sur les problématiques d'approvisionnement et considère que le temps d'attente du client est une variable d'ajustement en cas d'indisponibilité d'un des composants rentrant dans la fabrication du produit fini désiré. Dans la réalité, le délai commercial admissible est souvent inférieur au délai d'obtention des composants manquants rentrant dans la fabrication des produits finis. Un délai commercial non satisfait peut conduire à la perte du client. La durée qui sépare la date de commande de celle de la livraison du produit désiré doit généralement être considérée comme une contrainte et non comme une variable d'ajustement.

2.5. Axe 5 : Position du flux dans la CL

Selon le type de produit fini auquel est dédiée une CL, la distinction entre CL - amont et aval aura plus ou moins d'importance par rapport aux problématiques d'ECF et de partage d'informations.

Les travaux qui ont succédé aux premières études, menées par Forrester (1961), se sont rangés dans la même lignée en évoquant la problématique de l'ECF uniquement en CL - aval dédiée à la distribution de produits standardisés. Les rares articles qui s'intéressent aux problématiques d'ECF et de partage d'informations en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés sont descriptifs comme c'est le cas de Cachon et al. (2007) et de Childerhouse et al. (2008).

L'existence de liens de nomenclature directs entre produits finis et composants permet d'exploiter une partie des résultats obtenus en CL - aval sur la CL - amont en considérant qu'un produit unique circule le long de la CL, à ceci près qu'il n'est possible de produire un composant que si tous les composants élémentaires qu'il utilise sont disponibles, ce qui modifie l'analyse des ruptures de stock. Dans le cas d'une production de biens diversifiés, obtenus par combinaison de composants alternatifs ou optionnels, cette analogie entre CL - aval et CL - amont devient difficilement acceptable. La forte diversité rend impossible toute tentative de prévision de la demande au niveau des produits finis pouvant être exploitée en CL - amont. Dans ce contexte, l'information pertinente sur la demande porte sur les modules alternatifs et optionnels, limités en nombre, et non sur les produits finis. L'exploitation et le partage de cette information en CL - amont ne peuvent se faire directement. Le caractère incertain de la prévision, exprimée au niveau des modules, exige la mise en place de modèles de commande et de transmission de l'information garantissant son exploitabilité par les acteurs de la CL - amont pour une gestion efficace et efficiente de la CL qui minimise la contagion en cascade de perturbations à l'origine de l'ECF. Une proposition de modèle de gestion des approvisionnements et de partage d'informations en CL - amont est faite dans l'article de Giard et Sali (2012) pour traiter le cas d'une production de masse de produits fortement diversifiés.

2.6. Axe 6 : Modélisation de la demande

Le modèle de demande représente l'évolution de la consommation d'un produit fini par un client final. L'ECF est alors défini comme une distorsion de ce signal d'entrée en

remontant vers l'amont d'une CL. Un modèle de demande se différencie d'un modèle de prévision qui tente de l'anticiper. Dans les articles consultés, quatre catégories de modèles sont généralement utilisées pour caractériser la demande finale.

La première, la plus répandue, est celle des modèles auto-projectifs où la demande à l'instant t est la combinaison linéaire des demandes enregistrées dans le passé à laquelle on ajoute un terme d'erreur aléatoire. Agrawal et al. (2009), (Ganesh et al. (2007) et Pereira et al. (2009) utilisent un modèle autorégressif stationnaire d'ordre 1 pour représenter la demande. Bayraktar et al. (2008) utilisent un modèle de type ARIMA(p, d, q) impliquant une demande non stationnaire. Chen et Lee (2009) s'interrogent sur la valeur de l'information partagée dans un modèle de demande autorégressif généralisé.

La deuxième catégorie de modèles, elle aussi largement répandue dans la littérature, est celle des profils statistiques où la demande est stationnaire (modélisation par une loi de probabilité dont les paramètres restent stables dans le temps). Pour démontrer l'impact de la variabilité des délais de réapprovisionnement sur l'ECF, Bolarín et al. (2009) considèrent une demande stationnaire normalement distribuée. Lau et al. (2004) utilisent cette même loi de probabilité pour comparer différents modèles de partage d'informations. D'autres auteurs comme Croson et Donohue (2005) et Jung et al. (2007) caractérisent la demande finale à travers une loi de demande uniforme. Dans certains articles, les auteurs considèrent la possibilité que les paramètres du profil statistique, qui représente la demande, puissent évoluer dans le temps ; c'est le cas dans l'article de Li et Gao (2008a) où la moyenne et l'écart type de la loi normale, qui caractérise la demande, dépendent du cycle de vie du produit fini.

Le modèle économétrique, plus rare que les deux premiers, est le troisième type de modèles de demande retrouvé dans les articles consultés. Dans cette catégorie de modèles, la demande est une fonction de variables explicatives, souvent obtenue par régression linéaire. Ainsi, Li et Zhang (2008b) considèrent que la demande d'un produit fini quelconque dépend de son prix et de son degré de substituabilité avec les autres produits finis.

La quatrième et dernière catégorie de modèles de demande répertoriée est celle de la demande prédéterminée qui peut être issue d'une demande réelle enregistrée ou définie par une simple fonction du temps sans terme d'erreur. Kelepouris et al. (2007) analysent les effets croisés des paramètres de commande par recombêtement périodique, des délais d'obtention, du partage d'informations et des paramètres de prévisions sur l'ECF en se basant sur les ventes enregistrées d'un produit grand public.

Dans le cas d'une production de produits fortement diversifiés, compte tenu du nombre important de déclinaisons possibles des biens proposés, la demande finale porte sur des produits finis mais elle ne peut être appréhendée en tant que tel. La caractérisation de la demande dans ce cas doit se faire au niveau des modules alternatifs et optionnels au travers d'une structure de la demande représentée par une nomenclature de planification (Lamouri et Thomas, 2000). La nomenclature de planification d'un ensemble de modules alternatifs exclusifs entre eux décrit la structure moyenne d'utilisation de ces modules par un ensemble de produits finis généralement assemblés sur une même ligne. Dans cette configuration, la demande en modules alternatifs suit une loi multinomiale dont les paramètres sont la production périodique et le profil moyen d'utilisation des modules (Camisulis et Giard, 2010).

2.7. Axe 7 : Modèle de commande

La commande est l'information élémentaire partagée par les acteurs d'une CL. Une commande, transmise par un client à son fournisseur, comporte une dimension quantitative (quantité à livrer) et une dimension temporelle (dates de passation de commande et de livraison souhaitées). Un modèle de commande définit la façon dont ces deux éléments sont spécifiés. Plusieurs modèles de commande peuvent coexister au sein d'une même CL. Cheng (2009), par exemple, considère qu'il existe une combinaison optimale des politiques de réapprovisionnement qui minimise l'ECF. Le choix d'une politique de réapprovisionnement adaptée au type de flux qu'elle vise à réguler est essentiel. En fonction des choix organisationnels, des délais de production et de livraison et du niveau de connaissance qu'on peut avoir de la demande à venir, un modèle de commande sera plus ou moins adapté à une situation donnée. Se pose ensuite la question du dimensionnement de ses paramètres.

Le modèle de reapprovisionnement périodique consiste à passer systématiquement une commande à intervalle régulier auprès d'un fournisseur. Ce laps de temps séparant deux prises de décision successives est appelé période de révision calendaire. La quantité commandée varie habituellement d'une période à l'autre car elle vise à passer la position de stock à un niveau de reapprovisionnement dont le dimensionnement conditionne la performance de cette politique. Beaucoup d'auteurs utilisent le reapprovisionnement périodique comme modèle de commande car présentant l'avantage d'être simple à mettre en œuvre. Certains auteurs, comme Dejonckheere et al. (2003), Disney et Towill (2003) et Wright et Yuan (2008), portent un regard critique sur le modèle de reapprovisionnement périodique en considérant qu'il est en partie responsable de l'ECF. Ils estiment que la mise à jour des prévisions, laquelle implique

un nouveau calcul du niveau de reapprovisionnement, génère des fluctuations des quantités commandées, à l'origine de l'ECF. Pour contrer cet effet, ils proposent d'adapter la politique de reapprovisionnement en préconisant une transition progressive vers le nouveau niveau de reapprovisionnement. La transition progressive implique une sous-protection ou une surprotection sur les périodes de reconstitution si le nouveau niveau de reapprovisionnement est respectivement supérieur ou inférieur au précédent. La surveillance de l'évolution de la demande et l'anticipation des changements prévisibles sont des éléments clés pour assurer la transition vers un nouveau régime de croisière.

Le modèle du point de commande se caractérise par une périodicité variable de transmission des commandes et une quantité de commande fixe, s'il s'agit d'une quantité économique, ou variable s'il s'agit d'un reapprovisionnement. Les commandes sont déclenchées lorsque le stock devient inférieur à un seuil appelé point de commande. Ce modèle de commande s'appuie sur un suivi en temps réel de l'évolution des stocks. La technique du *Vendor Management Inventory* utilisée dans les articles de Cheng (2009) et de Wong et al. (2009) s'appuie sur ce type de modèle en exploitant une information en temps réel sur les niveaux de stocks du client qui remonte vers les fournisseurs¹. Au-delà du fait qu'il faille assurer un inventaire permanent, la politique du point de commande complique singulièrement l'organisation des expéditions, des transports et des réceptions qui interviennent à des intervalles irréguliers.

La méthode MRP a été mise au point pour établir, en un lieu certain, les programmes de production au plus tard d'un ensemble de références fabriquées par un ensemble d'unités de production garantissant le respect du PDP. Le PDP est un échéancier de mise à disposition de biens, correspondant le plus souvent à des produits finis, défini sur l'horizon de planification. Sa construction découle en général d'un compromis entre industriels et commerciaux autour de la traduction des prévisions de vente en plan de production. La MRP-I détermine, par simulation, le lancement au plus tard de tous les composants rentrant dans la composition des produits du PDP. Elle mobilise des mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais pour le pilotage des flux en CL - amont. En CL - aval, seul le mécanisme de décalage par les délais est mobilisé ; on parle alors de *Distribution*

¹ Dans le modèle classique du point de commande, le délai d'obtention est fixe ; dans le VMI, la connaissance en temps réel des stocks, permet d'organiser des tournées efficaces et efficientes sur la base d'une plage de valeurs de point de commande, ce qui n'est jamais clairement dit dans la littérature (ou globalement masqué dans un délai d'obtention surdimensionné).

Requirement Planning ou DRP. Les articles prescriptifs, qui utilisent la MRP-I comme modèle de commande en CL - amont, ne s'intéressent qu'à la seule situation où les produits finis sont standardisés ou faiblement diversifiée. C'est le cas dans l'article de Wangphanich et al. (2010) où seuls deux produits finis, faisant appel à un seul composant systématiquement utilisé, sont considérés dans la modélisation.

Beaucoup plus rare dans la littérature, on retrouve certains modèles de commande, tels que l'approvisionnement synchrone et le *kanban*, dont les principes sont inspirés de la philosophie du juste à temps. La mise en place de ce genre de modèles exige une grande stabilité et une connaissance précise des besoins futurs. Ces conditions caractérisent une situation idéale, souvent prise comme référence de comparaison par les auteurs, où l'ECF est inexistant. Cheng (2009) utilise l'approvisionnement synchrone comme base de comparaison avec d'autres modèles de commande. Dans sa modélisation de la CL - aval, les fournisseurs ont accès aux besoins détaillés de leurs clients à court terme et approvisionnent les points de livraison en temps et en quantité voulus. La mise en œuvre de cette méthode exige une coordination parfaite entre client et fournisseur et une proximité géographique entre les unités de production. En production synchrone de produits fortement diversifiés, la flexibilité des processus de production chez les fournisseurs vient s'ajouter aux deux premières exigences. La production synchrone ne peut être envisagée que pour des flux couverts par le PPC qui fixe la frontière entre ce qui peut être produit à la commande et ce qui doit l'être pour stock. Au-delà de l'horizon gelé, d'autres méthodes de calcul des commandes doivent être imaginées pour faire face au caractère incertain de la demande. Cette dernière remarque s'applique également à la MRP-I.

2.8. Axe 8 : Causes de l'ECF

Dans leur article, Lee et al. (1997) identifient les quatre causes majeures de l'ECF en CL - aval. Ils indiquent que l'actualisation de la prévision de la demande, la taille des lots, l'anticipation des pénuries et la variabilité des prix sont à l'origine de l'ECF. Les articles qui ont suivi, et qui se sont intéressés aux causes de l'ECF, se sont en général focalisés sur l'une des causes de ce phénomène pour mieux en cerner l'impact et en mesurer l'importance relative par rapport aux autres.

Dans une CL - aval organisée en série, Chatfield et al. (2004) tentent de quantifier l'impact de la variabilité des délais de réapprovisionnement et de la qualité de l'information

partagée sur l'ECF dans le cas d'une production de produits faiblement diversifiés. Leur conclusion est que le partage d'informations peut considérablement réduire l'ECF et que la variabilité des délais d'obtentions a tendance à l'augmenter. Sucky (2009) s'intéresse à la structure de la CL comme élément aggravant ou atténuant l'ECF. Il démontre, à travers un modèle de simulation, que l'ECF a tendance à être surestimé car en général mesuré sur des CLs en série qui ne permettent pas de tenir compte des phénomènes de mutualisation et de compensation. Cheng (2009) analyse l'impact de la combinaison des politiques de réapprovisionnement sur la performance de la CL et sur l'ECF en CL - aval dédiée à une production standardisée. Wang et al. (2005), de leur côté, introduisent la notion d'ECF étendu en ajoutant, à la liste des causes classiques de l'ECF, des causes d'ordre socio-organisationnelles.

L'inexistence d'information partagée ou le partage d'une information inutile sont présentés comme des causes de l'ECF par les articles dont l'objet est à la fois le partage d'informations et l'ECF.

Seuls Childerhouse et al. (2008) évoquent les mécanismes à l'origine de l'ECF en CL - amont. Ils exploitent les résultats d'une étude réalisée dans l'industrie automobile pour établir le lien de cause à effet, représenté sous la forme d'un cercle vicieux, entre l'instabilité des programmes de production prévisionnels et les phénomènes d'oscillations croissantes générés en conséquence le long de la CL - amont.

2.9. Axe 9 : Information partagée

Cet axe rend compte de la nature de l'information partagée autre que celle relative aux commandes passées.

L'information portant sur les niveaux de stocks revient souvent dans les articles traitant des stratégies de coopération en CLs de distribution. Wong et al. (2009) proposent un schéma de coordination entre clients et fournisseurs, axé sur le partage d'informations sur les niveaux de stocks du client, dans le cadre de la gestion partagée des approvisionnements. Dans une CL divergente, Moinzadeh (2002) compare, sur la base du coût global de gestion des stocks, une configuration dans laquelle le fournisseur a accès à l'information sur la demande finale et les niveaux de stock de ses clients et une autre dans laquelle aucune information, hormis les demandes de livraison, n'est partagée.

Les informations sur le produit concernent les caractéristiques intrinsèques des produits constituant les flux physiques échangés dans la CL. Elles peuvent être relatives à des caractéristiques physiques, comme par exemple la nomenclature des produits, ou à des attributs non physiques comme la durée de vie des produits (Li et Gao, 2008a).

L'information partagée sur la structure de la demande peut faire référence, dans le cas d'une production diversifiée, à la répartition de la demande sur un ensemble de composants alternatifs ou optionnels. Yee (2005) compare différents scénarios de structure de demande pour évaluer l'impact du partage d'informations, concernant le mix produit, sur la performance de la CL. Dans l'article de Ouyang (2007), l'information de structure est contenue dans les historiques de demandes transmis par un client à ses fournisseurs.

L'information partagée sur les processus concerne les règles de production, d'approvisionnement et de transport. Dans sa recherche d'une combinaison optimale de politique de réapprovisionnement, Cheng (2009) évoque la possibilité de partager l'information sur les paramètres des modèles de réapprovisionnement utilisés par les acteurs de la CL.

Partant du principe que le partage d'informations sur la demande peut éliminer tout ou partie des distorsions successives du signal en entrée de la CL, de nombreux auteurs, dont Chatfield et al. (2004) et Ouyang (2007), considèrent le partage d'informations sur la prévision de la demande finale comme étant clé pour l'amélioration de la performance de la CL en général et la réduction de l'ECF en particulier.

2.10. Axe 10 : Modélisation

Cet axe d'analyse décrit la façon dont le fonctionnement d'une CL est modélisée dans les articles. Deux grandes familles de techniques de modélisation existent et sont reprises dans la littérature : la modélisation analytique et la modélisation par simulation.

L'approche analytique utilise un formalisme mathématique pour modéliser des systèmes logistiques peu ou moyennement complexes où il est question généralement de CLs mono-produit de structures simples. Le principe de base de ce type de modélisation réside dans l'écriture des équations de conservation dans le temps et dans l'espace assurant la cohérence du système.

Les modèles de simulation sont apparus comme une réponse à la complexité des systèmes réels difficilement appréhendables à travers des approches analytiques. Ils consistent

en une représentation, plus ou moins fidèle à la réalité en fonction du niveau d'abstraction retenu, des règles et de la dynamique de fonctionnement du système. Apparue à la fin des années cinquante, la dynamique des systèmes est une méthode de modélisation basée sur l'utilisation de systèmes d'équations différentielles. Les modèles, construits à partir de cette méthode, permettent d'appréhender, en environnement certain, la dynamique d'un système à travers des liens d'interaction et des boucles de rétroaction entre les processus. Les transformations qu'implique le modèle résultent de modifications plus ou moins contrôlées que subissent les intrants provenant d'autres systèmes ou de l'environnement (Forrester, 1961). La simulation à événements discrets utilisée par Bayraktar et al. (2008) et Zhao et al. (2001) est une technique de simulation basée sur une discrétisation du temps et l'occurrence dynamique d'événements générés par des processus stochastiques. Ce type de simulation permet d'intégrer les incertitudes, régies par des lois statistiques connues, sur la demande, les délais et la qualité. Moins répondue dans la littérature, la simulation multi-agent permet de conceptualiser et de simuler un ensemble organisé d'agents autonomes en interaction, entre eux et avec leur environnement (Amblard et Phan, 2006). Cette technique est notamment utilisée par O'Donnell et al. (2009) qui modélisent les acteurs de la CL par des agents dont le comportement décisionnel de commande est régi par un algorithme génétique.

2.11. Axe 11 : Mesure de la performance

Pour les articles prescriptifs, il est nécessaire de disposer d'un ou plusieurs indicateurs permettant de comparer les alternatives proposées à une situation de référence.

L'intérêt du partage d'informations peut être abordé sous différents angles, ce qui peut parfois expliquer certaines contradictions dans les conclusions apportées par les différents auteurs quant à la valeur de l'information partagée. La performance, de manière générale, est une notion relative qui ne peut être appréhendée qu'à travers un différentiel de performance entre deux solutions. Dans le cas du partage d'informations, le différentiel est mesuré en comparant deux ou plusieurs techniques de partage d'informations, l'inexistence d'informations partagées étant généralement la situation de référence. La comparaison peut également se faire entre le partage d'informations et d'autres techniques visant à améliorer l'efficacité et l'efficience d'un système logistique. Dans l'article de Cachon et Fisher (2000), l'impact du partage d'informations sur la performance économique de la CL est comparé à celui de la réduction de la taille de lot et du délai de réapprovisionnement.

Nous retiendrons, dans la construction de notre grille, quatre classes d'indicateurs qui mesurent l'efficacité et l'efficacité des systèmes logistiques.

- Niveaux des stocks : dans cette classe on trouve des indicateurs de performance mesurant les niveaux de stocks détenus, d'encours ou de sécurité. Il s'agit d'indicateurs d'efficacité qui peuvent être globaux ou locaux. Cette vision de la performance se retrouve dans bon nombre d'articles comme celui de Viswanathan et al. (2007) où l'intérêt du partage de l'historique de la demande finale est appréhendé à travers sa capacité à réduire le niveau de stock global détenu dans la CL.
- Niveau de service : il regroupe les indicateurs d'efficacité portant sur la satisfaction client tel que le taux de service qui est le rapport entre la demande satisfaite et la demande exprimée, ou le temps d'attente qui mesure le temps qui sépare l'instant où une demande est exprimée et l'instant où elle est satisfaite. On retrouve ce type d'indicateurs, par exemple, dans l'article de Yee (2005) où il est question de temps d'attente du client et du nombre de demandes non satisfaites ou reportées.
- ECF (mesure de l') : considéré, en général, comme étant le rapport entre l'écart type de la commande et l'écart type de la demande, l'ECF traduit le phénomène de variabilité croissante de la demande le long de la CL qui est à l'origine d'une accumulation de stocks inutiles, de ruptures de stocks et de détérioration du taux de service. C'est à la fois un indicateur d'efficacité et d'efficacité.
- Économique : les indicateurs de performance économique fournissent une synthèse de l'impact économique des performances physiques d'un système. Dans bon nombre d'articles on retrouve des indicateurs de performance économique au côté d'autres indicateurs physiques.

2.12. Axe 12 : Analyse de l'impact

L'analyse de l'impact caractérise le protocole expérimental mobilisé pour rendre compte de la performance des méthodes proposées ou pour en illustrer le fonctionnement.

Comme pour le partage d'informations, l'analyse d'impact des études portant sur l'ECF se fait majoritairement par la confrontation, sur la base de méthodes statistiques, de résultats obtenus par simulation de plusieurs scénarios combinant différents paramètres pouvant influencer le phénomène étudié. Bayraktar et al. (2008) analysent l'impact des prévisions, réalisées par lissage exponentiel, sur l'ECF à travers un modèle de simulation combinant

plusieurs paramétrages possibles. Chatfield et al. (2004) utilisent des plans d'expérience suivis d'une analyse de la variance pour tester plusieurs scénarios de délais d'obtention et de partage d'informations. Lau et al. (2004) utilisent également l'analyse de la variance sur les résultats de simulation de plusieurs scénarios pour tester différents niveaux de partage d'informations. Zhao et al. (2001) utilisent des tests d'hypothèse pour évaluer l'impact des erreurs de prévisions sur la performance de la CL et sur la valeur de l'information partagée.

D'autres travaux se sont intéressés à des cas particuliers pour généralement illustrer des résultats analytiques à travers un jeu de données fictif ou réel. Bailey et Francis (2008) réalisent une étude critique sur le rôle du partage d'informations dans la maîtrise de l'ECF en se basant sur le cas de l'industrie de la viande rouge au Royaume-Uni. Ils démontrent que, dans ce cas précis, le seul partage d'informations ne peut suffire à la maîtrise des fluctuations de la demande en CL.

Conclusion

Le caractère contingent de nombreuses conclusions et recommandations formulées par les auteurs des articles étudiés est la première remarque qui s'impose. L'analyse « en creux » du Tableau II- 2 de synthèse révèle l'importance des études restant à mener pour une meilleure compréhension de l'ECF et caractérisation des informations permettant d'améliorer la performance du pilotage, décentralisé ou non, de la CL. C'est la seconde conclusion de cette analyse de la littérature.

Les recherches portent massivement sur l'étude de flux de produits standardisés dans la CL - aval, pour lesquels les modèles de demande et de commande mobilisés peuvent être adaptés. Dans l'ensemble étudié, seuls les articles de Childerhouse et al. (2008) et de Cachon et al. (2007) se sont intéressés aux problématiques de l'ECF et du partage d'informations en CL - amont dédiée à la production de produits diversifiés.

Les structures de CL reflètent également la classe de problématiques visée par les récents travaux de recherche. Si les configurations en série et divergentes peuvent, sous certaines conditions, permettre d'appréhender le fonctionnement de CL - aval, il n'en est pas de même pour les CL - amont.

Les mécanismes à l'origine de l'ECF en CL - amont sont très peu évoqués dans la littérature. À ceux identifiés en CL - aval dédiée à la production de masse de produits

standardisés, viennent s'ajouter des phénomènes liés aux mécanismes d'explosion des nomenclatures et aux règles de pilotage des flux (plus compliqué lorsque l'unité productive fabrique plusieurs composants et/ou travaille pour plusieurs CLs). L'intervalle de temps séparant l'assemblage d'un produit fini, de la production la plus ancienne des composants élémentaires définit l'inertie de la CL - amont. Les changements de la demande finale, induite par la politique commerciale (actions tarifaires, promotionnelles...) de l'entreprise propriétaire de l'unité d'assemblage, ou des entreprises concurrentes ont des impacts souvent trop rapides par rapport à l'inertie de la CL - amont, ce qui constitue de nouvelles sources de perturbations, pas toujours générées par la concurrence.

Le tableau ci-dessous positionne, par rapport à la grille d'analyse retenue dans ce chapitre, notre problématique de recherche. Le champ de recherche, révélé par ce tableau présente l'intérêt scientifique d'appartenir à une classe de problèmes peu abordée dans la littérature et qui occupe une place importante dans le monde industriel.

Axes d'analyse	Items
Domaine traité	ECF
	Partage d'informations
Objectif de l'article	Descriptif
	Prescriptif
Type de décision	Tactique
Structure de la CL	Dyadique
	Série
	Divergent
	Convergent
Type de produits finis	Diversifié
Position du flux dans la CL	Amont
Modélisation de la demande	Profil statistique
Modèle de commande	MRP
	Niveau de reapprovisionnement
Causes de l'ECF	Variabilité de la demande
	Modèle de commande
	Information partagée
Information partagée	Structure de la demande
Modélisation	Analytique
Mesure de la performance	Stocks
	Niveau de service
	ECF
Analyse de l'impact	Étude de cas

Tableau II- 3 : Positionnement de la problématique par rapport à la grille d'analyse de la littérature

Le positionnement de la problématique, par rapport à la grille d'analyse de la littérature, permet d'entrevoir les concepts théoriques qui seront mobilisés dans les chapitres suivants. L'objet du chapitre III est de détailler certains de ces concepts structurants et les confronter la réalité de leur mise en œuvre par Renault. Les écarts entre pratique et théorie orienteront la

formulation de l'hypothèse de recherche et le sens du diagnostic qui sera réalisé en deuxième partie.

CHAPITRE III

CADRE DE RÉFÉRENCE DE L'ÉTUDE

Introduction

Dans ce chapitre, nous positionnons les aspects pratiques de l'étude par rapport à un corpus théorique plus large dont certains aspects ont été développés en chapitre II. Nous faisons volontairement le choix de focaliser notre attention sur les éléments qui caractérisent le modèle de gestion de la CL - amont de Renault et qui font la particularité de la problématique traitée ici. Le chapitre précédent a révélé les domaines non encore explorés par la littérature spécialisée dans l'étude des phénomènes d'ECF et de partage d'informations en CL. Le sujet auquel on s'intéresse se trouve au carrefour de ces domaines. La problématique que nous traitons relève du pilotage de flux-amont et de la production de biens fortement diversifiée. C'est autour de ces deux éléments qu'il convient de développer le cadre de la recherche pour formuler l'hypothèse de recherche et fixer les bases du diagnostic qui sera mené en deuxième partie de ce document.

Nous commencerons par spécifier les modes de pilotage de flux-amont avant de préciser l'usage, fait par Renault, de certains dispositifs de la MRP. La diversité sera traitée sous l'angle des nomenclatures qui revêtent une organisation particulière en production fortement diversifiée. Nous finirons par formuler l'hypothèse de recherche sur l'origine des perturbations observées en CL-amont.

1. Pilotage des flux et partage d'informations en CL - amont

1.1. Modes de pilotage en CL

On distingue généralement deux modes de pilotage en CL qui se différencient par le mode de gouvernance et de coordination de la gestion des flux à un niveau tactique.

Dans un mode de pilotage décentralisé, chaque maillon garde son autonomie quant aux règles de décisions mises en place. L'échange d'informations entre les maillons de la CL y est limité généralement aux seules commandes passées par un client à son fournisseur. La décentralisation, rendue parfois nécessaire par des obstacles juridiques, organisationnels ou

technologiques, conduit à une logique d'optimisation locale. Du fait que la réunion d'optima locaux n'aboutit pas à un optimum global et que les décisions prises localement s'appuient sur une anticipation réduite conduisant à des prises de décision inadaptées, les effets pervers de ce mode de fonctionnement peuvent conduire à des performances globales peu satisfaisantes.

Le pilotage centralisé consiste à déléguer toute ou partie de l'activité du pilotage des flux à l'une des entités constitutives de la CL ou à un partenaire externe. Ce mode de pilotage offre l'avantage d'une vision globale lors du choix des règles de gestion et permet d'établir une cohérence décisionnelle le long de la CL. L'une des conditions nécessaires à la réussite d'un pilotage centralisé est la transparence, la pertinence et la cohérence des informations partagées entre les acteurs de la CL. La mise en œuvre d'un pilotage centralisé se heurte à des contraintes juridiques lorsque les maillons d'une CL appartiennent à des entités différentes voire concurrentes ; un autre obstacle est la présence de maillons appartenant à des CLs différentes.

Dans la réalité, le clivage entre pilotage centralisé et pilotage décentralisé n'est pas toujours net. Pour éviter les effets pervers des prises de décisions locales, tout en sauvegardant l'autonomie décisionnelle des acteurs de la CL, le partage d'informations est envisagé comme une alternative aux barrières juridiques. Les informations partagées et leurs modalités de diffusion font l'objet d'accords contractuels entre clients et fournisseurs. Le partage d'informations a pour but de nourrir les processus décisionnels en CL pour une meilleure efficacité dans le pilotage des flux. Les nombreux articles qui se sont intéressés au rôle du partage d'informations en CL - aval établissent un large consensus quant à son impact positif sur le pilotage des flux (Thonemann, 2002), (Lau et al., 2004) et (Ryu et al., 2009). En CL - amont les modalités de partage des informations et leur utilisation dans le cadre d'un pilotage décentralisé restent à définir.

1.2. Partage d'informations et aspects contractuels entre Renault et ses fournisseurs

Renault a fait le choix d'un pilotage des flux-amont décentralisé. Dans le cadre des accords qui la lient à ses fournisseurs de premier rang, l'entreprise Renault s'engage à transmettre trois informations, chacune aidant à la prise d'un certain type de décision. Les caractéristiques de ces informations sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Informations partagées	Type de décision	Horizon (min/max)	Fréquence d'émission	Mise à jour	Agrégation
Demande capacitaire	Stratégique : Gestion des capacités	1 an / 2 ans	Annuelle	En début d'année	Quadrimestre
Demande de livraison prévisionnelle	Tactique : Gestion des approvisionnements	6 mois	Hebdomadaire	Chaque semaine	Semaine
Demande de livraison ferme	Opérationnelle : lancements en production, expéditions et transport	1 jour / 1 semaine	Quotidienne / Hebdomadaire		Jour / Semaine

Tableau III- 1 : Informations partagées par Renault avec ses fournisseurs de premier rang

La demande capacitaire a pour but d'aider le fournisseur à faire des choix stratégiques concernant, entre autres, ses investissements capacitaires et sa politique de sous-traitance. Cette information est transmise aux fournisseurs de premier rang en début d'année et leur indique, compte tenu des prévisions de vente à long terme de véhicules, les quantités maximales de consommation des composants approvisionnés par quadrimestre sur un horizon de deux ans. La présence d'une période de recouvrement entre deux demandes capacitaires fait que l'horizon de visibilité est d'une année au minimum (Cf. Tableau III- 2).

Période de transmission	Année A									
	Année A+1									
		Quadrimestre 1	Quadrimestre 2	Quadrimestre 3	Quadrimestre 1	Quadrimestre 2	Quadrimestre 3	Quadrimestre 1	Quadrimestre 2	Quadrimestre 3
		Année A			Année A+1			Année A+2		
		Horizon								

Tableau III- 2 : Demande capacitaire

Le fournisseur doit s'engager à honorer une commande client, cumulée sur chaque quadrimestre, équivalente au seuil de la demande capacitaire. De son côté, Renault ne s'engage pas à lisser ses commandes sur chaque quadrimestre et s'autorise ainsi à passer des commandes dépassant ponctuellement la capacité moyenne demandée. Le fournisseur doit appréhender la demande capacitaire comme la moyenne d'une variable aléatoire et non comme une information certaine. Cette observation reste valable lorsqu'un fournisseur appartient à plusieurs CLs différentes ; sa capacité est alors partagée entre plusieurs clients, chacun pouvant ponctuellement dépasser ou pas les seuils capacitaires. Le calcul de capacité doit tenir compte de ces phénomènes de compensation (Camisullis, 2008).

La demande de livraison prévisionnelle d'un composant est une information mise à jour chaque semaine. Elle couvre un horizon hebdomadaire de six mois (entre 24 et 27 semaines)

tronqué par le délai d'obtention (Cf. Tableau III- 3). C'est une information de type tactique dont l'objectif est de donner une visibilité aux fournisseurs sur les demandes à venir pour qu'eux-mêmes puissent gérer leurs propres approvisionnements. Dans la mesure où les nouvelles quantités respectent globalement l'engagement capacitaire, aucune demande prévisionnelle n'est contraignante pour Renault qui s'autorise à augmenter ou à diminuer les quantités prévisionnelles à n'importe quel moment.

La demande de livraison ferme¹ est la commande en composants que Renault transmet à ses fournisseurs. Elle est envoyée, selon la proximité géographique des fournisseurs, chaque semaine ou chaque jour pour couvrir respectivement un besoin hebdomadaire ou quotidien décalé par le délai d'approvisionnement². C'est la somme par quadrimestre des demandes de livraison fermes qui est comparée au dernier seuil capacitaire validé par Renault et le fournisseur.

Le tableau ci-dessous donne la vision qu'a un fournisseur des informations de demandes fermes (F) et prévisionnelles (P) transmises par Renault. On suppose que le composant fourni présente un délai d'obtention de *L* semaines.

Période de transmission	Semaine S					F	P	P	P	P	P	P	P	P			
	Semaine S+1						F	P	P	P	P	P	P	P	P		
	Semaine S+2							F	P	P	P	P	P	P	P	P	
	Semaine S+3								F	P	P	P	P	P	P	P	P
	Semaine S	Semaine S+1	Semaine S+2	Semaine S+3	Semaine S+L	Semaine S+L+1	Semaine S+L+2	Semaine S+L+3	Semaine S+L+4	Semaine S+L+5	Semaine S+L+6	Semaine S+L+7	Semaine S+24	Semaine S+25	Semaine S+26	Semaine S+27	
Horizon																	

Tableau III- 3 : Demandes fermes et prévisionnelles

Les demandes de livraison fermes et prévisionnelles résultent d'un calcul qui reprend les mécanismes de base de la MRP. Nous nous intéresserons, dans ce qui suit, au fonctionnement théorique puis opérationnel chez Renault de cette méthode.

¹ La notion de **demande de livraison ferme** est différente de celle de **film ferme** décrite dans le §2.2.

² Des exceptions existent en approvisionnements synchrone avec des commandes pluriquotidiennes pour des besoins exprimés sur quelques heures.

2. Le *Material Requirement Planning*

La MRP est une méthode empirique de planification de la production de tous les composants rentrant dans la fabrication de produits finis complexes. Elle vise à assurer leur mise à disposition conformément à un PDP sur un ensemble de périodes à venir. Cette démarche, développée dans les années 70 par Orlicky (1975), repose sur des mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais et quelques règles de décisions simples. Nous commencerons par présenter quelques généralités sur cette méthode avant de nous intéresser à la façon dont elle est mise en œuvre par Renault.

2.1. Généralité sur la MRP

La MRP s'appuie sur une planification de la production et non sur une logique de renouvellement des consommations de composants. Cette particularité, associée à certaines conditions d'anticipation, permet à la MRP de mieux s'accommoder des changements structurels de la demande qu'il est possible d'anticiper.

2.1.1. Conditions de mise en œuvre de la MRP

Selon Giard (2003), la mise en place de la MRP nécessite la disponibilité de quatre types d'informations :

- PDP : le PDP découle généralement d'un programme de production à long terme ; il définit, période par période, sur un horizon de planification, un programme de mise à disposition de produits finis. Le PDP devant répondre à la fois à des exigences commerciales et à des contraintes de faisabilité industrielles, il résulte très souvent d'une négociation entre la direction commerciale et la direction industrielle ou leurs équivalents. Dans le cas d'une faible diversité, le PDP est généralement défini au niveau des produits finis. Dans le cas d'une forte diversité, le PDP est généralement défini à un niveau de nomenclature agrégé supérieur à celui des produits finis (Lamouri et Thomas, 2000). Le problème de l'assemblage à la commande, qui relève du court terme, est découplé de celui de la production des composants utilisés.
- Nomenclature exhaustive et à jour : la nomenclature est une codification exhaustive et non ambiguë de tous les composants nécessaires à la fabrication des produits finis présents dans le PDP. Les gammes de fabrication permettent de hiérarchiser l'ensemble de ces

composants selon leur étape d'intégration dans le processus de fabrication du produit fini. Cette hiérarchisation permet de définir des niveaux de nomenclature, le niveau 0 étant celui du produit fini. La nomenclature « classique » d'un composant i de niveau n décrit la liste des composants j de niveau $n+1$ qu'elle utilise, avec le nombre a_{ij} d'unités du composant j utilisé dans la fabrication du composant i . a_{ij} est le coefficient de nomenclature du composant j par rapport au composant i .

- Système d'information fiable : pour définir au plus juste les quantités à lancer en production ou en approvisionnement, la MRP implique une connaissance correcte de l'état du stock d'un composant au début ou à la fin de chacune des périodes constitutives de l'horizon de planification retenu.
- Délais d'obtention : la MRP visant à déterminer une programmation au plus tard de la production et des approvisionnements, cette information est nécessaire à la détermination des périodes de lancement en fabrication ou de passation de commande. D'une manière générale, le délai d'obtention comprend des temps de fabrication, de transport et d'attente. Ces temps d'attente sont en partie liés au fait que l'unité de production fabrique plusieurs composants, et que la programmation fine de la fabrication de tous ces composants relève d'une problématique d'ordonnancement. Le temps de transport concerne l'acheminement des composants fabriqués vers les unités qui les utilisent ; dans de nombreux systèmes productifs, ces unités sont voisines et ces temps de transport représentent une fraction négligeable de la durée de la période unitaire utilisée dans le découpage temporel de la MRP. Sous la conjonction de deux facteurs, la mondialisation de la CL et la diminution de la durée de la période unitaire utilisée dans les systèmes MRP, ce temps de transport peut être significatif et correspondre à plus d'une période. Dans ce cas, il convient d'insérer dans le mécanisme de la MRP des opérations de transport, avec une nomenclature de 1 pour 1 et un délai d'obtention correspondant au délai de transport ; dans ce contexte, l'organisation du transport (lotissement, tournées...) n'est pas plus abordée que ne l'est l'ordonnancement de la production dans la fabrication d'un composant dans le cadre de la MRP.

2.1.2. Horizons du PDP

Initialement conçu pour opérer dans un contexte certain, la MRP a connu plusieurs adaptations depuis sa première version parue dans l'ouvrage de Orlicky (1975). Une des

premières évolutions, qui désormais fait partie du standard MRP, a été d'introduire un horizon gelé sur les premières périodes de planification qui garantit une demande certaine pour les approvisionnements et stable pour l'ordonnancement.

L'horizon de planification H_P du PDP, se décompose en un horizon gelé H_G et un horizon non-gelé H_{NG} comme illustré ci-dessous.

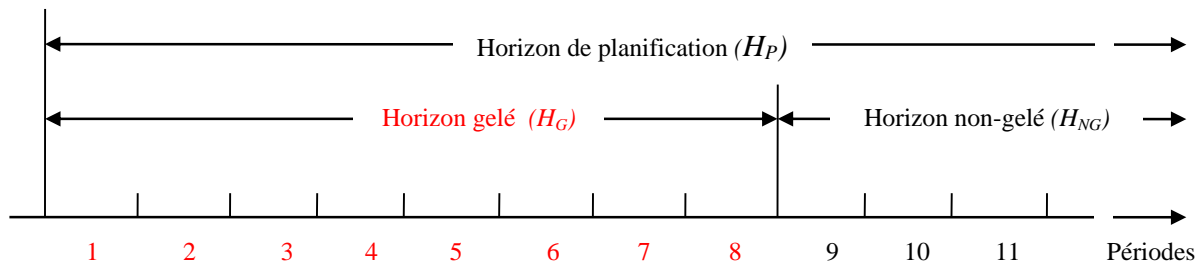


Figure III- 1 : Horizons de la MRP

L'horizon de planification est découpé en périodes élémentaires dont le nombre est au moins égal au plus grand des cumuls des délais d'obtention¹ des composants de niveau de nomenclature le plus élevé et gérés dans le cadre de la MRP.

Les réquisitions du PDP sur l'horizon gelé ne peuvent être modifiées. Cet horizon définit le PPC, point de découplage entre production à la commande et production pour stock.

Le processus de MRP est déclenché à cadence régulière, celle-ci étant définie par la période élémentaire retenue pour le PDP. Dans ce mécanisme de planification glissante, les décisions prises au début de la période t utilisent les informations du PDP allant de la période t à la période $t+H_P-1$, sachant que seules les informations des H_G premières périodes (allant de t à $t+H_G-1$) ne peuvent être modifiées ultérieurement. Les décisions prises au début de la période suivante ($t+1$) se fondent sur un PDP défini pour les périodes $t+1$ à $t+H_P$. Les informations du PDP des périodes $t+1$ à $t+H_G-1$ sont nécessairement identiques à celles utilisées lors de la prise de décision précédente. Celles de la période $t+H_G$ peuvent être différentes de celles utilisées lors de la prise de décision précédente mais restent inchangées lors des prises de décisions ultérieures. Les informations des périodes $t+H_G-1$ à $t+H_P-1$ peuvent changer et celles de la période $t+H_P$ sont introduites à l'occasion de la prise de décision au début de la période $t+1$.

¹ Correspond au chemin critique du graphe représentant la nomenclature du produit fini pondéré par les délais d'obtention.

2.1.3. Mécanismes de la MRP

Les calculs des lancements en production résultent d'une exploitation des informations du PDP à travers les deux mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais.

L'explosion des nomenclatures conduit à multiplier les quantités du PDP par les coefficients de nomenclature pour obtenir l'échéancier des besoins bruts de chaque composant de niveau 1 dans la nomenclature¹. Cette opération s'applique simultanément à tous les composants de même niveau de nomenclature et se renouvelle pour les niveaux supérieurs en considérant les lancements du niveau inférieur.

Pour chaque composant, les besoins bruts issus de l'explosion des nomenclatures sont ajustés par les livraisons attendues, le stock détenu et le stock de sécurité cible pour aboutir à des besoins nets. L'absorption des délais consiste à décaler les besoins nets d'autant de périodes élémentaires que compte le délai d'obtention du composant. Les besoins nets décalés constituent les lancements en production sachant que seul le lancement de la première période est exécuté ; les lancements qui se situent au-delà de cette première période ont un caractère prévisionnel et servent aux calculs de lancements en production des composants de niveau supérieur dans la nomenclature.

À une date donnée, les étapes de calcul de la MRP se répètent autant de fois qu'il y a de composants gérés en nomenclature. Le processus se renouvelle dans une logique glissante après l'écoulement d'une période élémentaire selon les principes évoqués dans le §2.1.2.

2.1.4. Politiques de lotissement en MRP

Une politique de lotissement est un ensemble de règles visant à regrouper les lancements en production pour minimiser une fonction de coût. Un des objectifs de la méthode MRP est de minimiser les coûts de possession, à travers une logique de livraison au plus tard des composants. À cet effet, la politique du lot pour lot est la technique adoptée par défaut lorsque le coût de lancement est négligeable ou que l'on juge inutile de le prendre en considération, notamment parce que le lotissement est incompatible avec un certain lissage de la production dans les différentes entités productives. Elle consiste à livrer systématiquement en début de

¹ Lorsque le PDP fait référence aux quantités à produire de niveau 1 dans la nomenclature, comme ça peut être le cas dans le cadre d'une production diversifiée, l'explosion des nomenclatures s'applique en premier sur ces composants pour obtenir les besoins bruts des composants de niveau 2.

chaque période la quantité nécessaire, arrondie selon une unité d'emballage si besoin, à couvrir les besoins nets de la période en question.

Il existe d'autres politiques de lotissement envisageables visant le plus souvent à trouver l'arbitrage économique optimal entre coût de lancement et coût de possession. L'heuristique de *Silver et Meal* consiste à trouver le nombre de périodes n à couvrir qui minimise le quotient de la somme du coût de lancement et de possession sur les n périodes de consommation de la quantité livrée, par le nombre n de périodes. L'algorithme de *Wagner Whitin* s'applique aux cas où le coût d'achat ou de production est une fonction concave de la quantité à commander.

Dans le cas d'une planification glissante, qui engendre une mise à jour des quantités du PDP situées au-delà de l'horizon gelé, les politiques de lotissement, autres que celle du lot pour lot, peuvent être génératrices de perturbations connues sous le nom de nervosité (Blackburn et al., 1985). Elles peuvent également être source de non régularité dans les opérations de livraison, de réception et de transport.

2.2. La MRP chez Renault

Les quatre conditions préalables à la mise en place d'une MRP rappelées dans le §2.1.1 sont assurées par :

- Un *Plan Directeur de Fabrication Véhicules* (PDFV), qui joue le rôle du PDP
- Une *documentation* datée et à jour, qui fait référence aux nomenclatures.
- Le système de *Gestion de Production Intégrée* (GPI) qui est le système d'information qui supporte le fonctionnement informatique de la MRP. Il remplit les deux dernières conditions de mise en œuvre de la MRP en regroupant les informations qui concernent l'état des stocks et les délais d'obtention.

Défini sur un horizon de six mois selon un découpage hebdomadaire, le PDP de Renault comporte un horizon gelé de 7 jours appelé *film ferme*. Le PDP est défini au niveau des produits fini et non à un niveau intermédiaire de la nomenclature comme c'est généralement le cas en production diversifiée ; les raisons de ce choix seront expliquées dans le §3.2. La diversité des produits finis empêchant toute tentative de prévision directe sur chaque véhicule fabricable, les volumes du PDP sont issus d'une interprétation de la demande commerciale

décrite à un niveau inférieur de nomenclature. Les étapes de cette interprétation seront détaillées et analysées en chapitre V.

Les véhicules du PDP sont traduits en besoins bruts de composants puis en besoins nets et enfin enancements ou demandes fermes transmis(es) aux fournisseurs en lot pour lot après l'application d'un arrondi d'emballage. En plus de la commande, les UCM partagent avec leurs fournisseurs, qu'ils soient internes ou externes, une demande prévisionnelle en composants. Le calcul de cette demande s'appuie sur les mêmes principes que ceux utilisés pour le calcul de la quantité à commander. Malgré le caractère incertain de la demande prévisionnelle, lorsqu'elle est issue d'informations hors horizon gelé du PDP, aucune indication n'est transmise aux fournisseurs quant aux règles à mettre en place pour contrer l'incertitude. Dans les contrats conclus avec ses fournisseurs externes, Renault ne prend aucun engagement quant à la fiabilité de la demande prévisionnelle en composants. Seul le cumul des quantités commandées doit être conforme aux volumes du contrat capacitaire que Renault s'engage à respecter.

Le principe de calcul des commandes et des demandes prévisionnelles s'inspire des deux mécanismes de la MRP que sont l'explosion des nomenclatures et l'absorption par les délais. L'application de la méthode MRP *stricto sensu* n'est pas possible dans les conditions évoquées dans le paragraphe précédent et ce pour deux raisons principales.

- La MRP classique relève d'un pilotage centralisé de la CL - amont par l'entité qui gère les lignes d'assemblage final rendu possible seulement si le périmètre juridique des acteurs de la CL est commun.
- La MRP classique n'est pas adaptée à une exploitation directe en équivalent certain des informations hors horizon gelé pour le calcul de la demande prévisionnelle.

L'exploitation directe d'une information prévisionnelle incertaine par un maillon de la CL - amont confronte ce dernier à un risque de rupture si la demande est revue à la hausse et à un risque de stockage inutile si la demande est revue à la baisse. Pour se prémunir de ces risques, dans le cadre d'un pilotage décentralisé, chaque maillon met en place des règles de gestion spécifiques dont les effets pervers ont été évoqués dans le §1.1.

Dans la réalité, et comme c'est le cas de la plus part des fournisseurs externe de Renault, les maillons d'une CL appartiennent à des entités juridiques différentes ce qui rend difficile la mise en œuvre de la MRP dans sa version centralisée. L'adaptation de la MRP doit s'opérer de telle sorte à garantir l'efficacité et l'efficience des décisions prises dans le cadre d'un

pilotage décentralisé. L'atteinte de cet objectif passe par la définition d'un cadre contractuel, entre Renault et ses fournisseurs, qui spécifie les modalités d'exploitation de l'information partagée.

3. Organisation des nomenclatures

L'organisation des nomenclatures conditionne la définition du PDP dont les informations servent au pilotage de la CL - amont. En production de masse de produits fortement diversifiés, plusieurs possibilités d'organisation des nomenclatures sont envisageables, chacune présentant des avantages et des inconvénients pour le pilotage des flux-amont. Avant de voir l'organisation des nomenclatures chez Renault, nous commencerons par développer quelques considérations théoriques sur l'organisation des nomenclatures.

3.1. Nomenclatures en production fortement diversifiée

L'organisation des nomenclatures est un élément structurant dans le choix des méthodes de pilotage des flux. L'existence d'une nomenclature mise à jour, complète et non ambiguë fait partie des conditions de mise en œuvre de la MRP. L'organisation d'une nomenclature fait référence à la façon dont les composants des produits finis sont liés entre eux.

Dans une vision classique de la nomenclature en MRP, valable dans le cas d'une production faiblement diversifiée, la nomenclature de chaque produit fini est représentée sous la forme d'un graphe où les composants codifiés sont liés par des arcs pondérés par un coefficient de nomenclature et orientées du niveau de nomenclature le plus bas vers le plus haut (éclatement des nomenclatures). Le niveau le plus bas de nomenclature correspond au produit fini. Lorsque le nombre de produits fini est limité, les nomenclatures sont décrites unitairement et font l'objet d'un suivi spécifique pour chaque produit.

En production fortement diversifiée, le nombre de produits finis est très grand et les nomenclatures ne peuvent être représentées pour chaque produit séparément selon le schéma classique. En conception modulaire, un produit fini est vu comme une combinaison de modules chacun sélectionné parmi un ensemble de modules alternatifs exclusifs entre eux. Les nomenclatures des modules, limités en nombre, sont représentées selon le format classique. Ainsi, pour identifier l'ensemble des composants nécessaires à la fabrication d'un

produit fini, il suffit de connaître la combinaison des modules alternatifs qui le caractérise. Le nombre de composants élémentaires nécessaires à la fabrication d'un certain nombre de produits finis, se déduit directement du nombre de modules alternatifs utilisés faisant appel à cette pièce.

La possibilité de définir des besoins en composants élémentaires à partir des besoins en modules alternatifs est à l'origine du concept de PDP à deux niveaux (Lamouri et Thomas, 2000). La planification ne pouvant être assurées au niveau des produits finis, le PDP se définit au niveau des modules alternatifs dont les taux d'utilisation moyens associés à un volume de production global constituent une nomenclature de planification.

La possibilité de gérer l'ensemble des composants en nomenclature de planification est soumise à une hypothèse forte de standardisation complète des interfaces entre les modules alternatifs appartenant à des ensembles distincts. Cette situation n'est pas toujours celle qui prévaut dans la réalité où certaines combinaisons de modules alternatifs font appel à des composants particuliers qu'on se propose de nommer : « composants de jonction ».

Un composant de jonction est un élément qui permet le couplage technique entre des modules alternatifs appartenant à des ensembles différents. On parlera de composant de jonction uniquement dans le cas où l'utilisation de l'élément pour le couplage est fonction de la combinaison de modules alternatifs ; dans le cas contraire, il s'agira de composant standard systématiquement monté.

Pour illustrer ce concept de composants de jonction, prenons l'exemple d'un produit défini par la combinaison de modules $A_{i_A}, B_{i_B}, \dots, M_{i_M}$ sélectionnés respectivement dans les ensembles de modules alternatifs A, B, \dots, M avec $k = A, B, \dots, M$ et $i_k = 1 \dots \text{card}(k)$. Si on s'intéresse au couplage entre les modules de l'ensemble A et ceux de l'ensemble B , on notera le composant qui permet de faire l'association entre les modules A_{i_A} et B_{i_B} par $AB_{i_{AB}}$ appartenant à l'ensemble AB . Le composant $AB_{i_{AB}}$ peut non seulement varier selon les couples (A_{i_A}, B_{i_B}) mais il se peut qu'aucune pièce de jonction ne soit nécessaire pour certains de ces couples. Pour garder une formulation générale, on suppose que l'ensemble AB comporte un composant virtuel AB_0 correspondant à une absence de composant de jonction ; i_{AB} prend alors ses valeurs dans l'intervalle $[0, \text{card}(A) \times \text{card}(B)]$. Si $\forall (A_{i_A}, B_{i_B}) \in A \times B$ $i_{AB} = 0$, aucun composant n'est nécessaire à aucune des combinaisons entre les modules de

l'ensemble A et ceux de l'ensemble B . Si $\forall (A_{i_A}, B_{i_B}) \in A \times B \quad i_{AB} = 1$ alors il existe un composant unique permettant de faire le lien entre les modules de l'ensemble A et ceux de l'ensemble B ; on est présence d'un composant systématiquement monté. Si $\exists (A_{i_A}, B_{i_B}) \in A \times B$ et $\exists (A_{i'_A}, B_{i'_B}) \in A \times B$ tels que $i_{AB} \neq i'_{AB}$ alors il existe au moins deux combinaisons de modules qui font appel à des composants de jonction différents. Dans ce dernier cas, les nomenclatures de planification, décrites au niveau des modules alternatifs appartenant aux ensembles A et B , ne suffisent plus pour calculer les besoins au niveau des composants de jonction. Une façon de remédier à ce problème, est d'introduire un niveau de nomenclature additionnel représenté par l'ensemble $\alpha\beta$ de modules alternatifs virtuels dont chaque modalité $\alpha\beta_{i_{\alpha\beta}}$ inclut un module réel A_{i_A} , un module réel B_{i_B} et le composant de jonction $AB_{i_{AB}}$ correspondant. Dans ce cadre, la description d'un produit fini passe par l'utilisation de l'un des composants alternatifs virtuels $\alpha\beta_{i_{\alpha\beta}}$ au lieu de passer par l'utilisation d'un module alternatif réel A_{i_A} , d'un module alternatif réel B_{i_B} et d'un composant de jonction $AB_{i_{AB}}$. Cette façon de faire permet de conserver les avantages des nomenclatures de planification, mais elle présente un certain nombre d'inconvénients qui en limite l'intérêt.

En effet, plusieurs ensembles de modules alternatifs virtuels ne peuvent pas coexister si l'intersection des ensembles de modules alternatifs réels auxquels ils font appel est non vide. Prenons l'exemple de deux ensembles de modules alternatifs virtuels $\alpha\beta$ et $\beta\gamma$ construits respectivement à partir des ensembles $A \times B$ et $B \times C$. Si un des modules alternatifs virtuels $\alpha\beta_{i_{\alpha\beta}}$ de l'ensemble $\alpha\beta$ fait appel aux modules réels A_{i_A} et B_{i_B} , et que dans le même temps, un des modules alternatifs virtuels $\beta\gamma_{i_{\beta\gamma}}$ de l'ensemble $\beta\gamma$ fait appel aux modules réels B_{i_B} et C_{i_C} , la logique d'explosion des nomenclatures conduit à calculer un besoin de deux modules alternatifs réels B_{i_B} pour un même produit fini. Un produit fini ne pouvant être décrit par l'utilisation d'un composant alternatif virtuel $\alpha\beta_{i_{\alpha\beta}}$ et d'un composant alternatif virtuel $\beta\gamma_{i_{\beta\gamma}}$, il faut introduire un nouvel ensemble de modules alternatifs virtuels $\alpha\beta\gamma$ qui fusionne les informations des deux ensembles $\alpha\beta$ et $\beta\gamma$. Ce mécanisme est à poursuivre tant que l'on trouve un nouvel ensemble de modules alternatifs liés par des composants de jonction à des

modules d'un ensemble de modules alternatifs réels précédemment pris en compte. Dans la pratique, la cardinalité des ensembles de modules virtuels étant trop élevée, il est compliqué d'obtenir et de maintenir des informations de planification à ce niveau.

Nous ne disposons que de très peu d'écrits sur la gestion des composants de jonction. Bertrand et al. (2000) proposent une représentation en nomenclature générique qui permet de configurer un produit fini à partir de ce que les auteurs appellent des *pseudoitems*. Un *pseudoitem* est un ensemble de composant remplissant une fonction et dont le besoin pour l'assemblage d'un produit fini s'exprime toujours en ensemble. Selon cette définition, tout module alternatif est un *pseudoitem*. Les choix réalisés sur les fonctions du produit fini conditionnent le type de composant de jonction à utiliser pour assurer la faisabilité technique de l'assemblage. Les composants de jonction sont donc identifiés en dernière étape de la configuration et regroupés dans un *pseudoitem* ; ils sont considérés comme une fonction à part entière.

Selon le modèle de configuration proposé par Bertrand et al. (2000), et en reprenant les notations d'ensembles de modules A, B, \dots, M , un produit fini PF_i est décrit comme suit : $PF_i = A_{i_A} + B_{i_B} + \dots + M_{i_M} + CJ_i$ avec $CJ_i = f(A_{i_A}, B_{i_B}, \dots, M_{i_M})$. L'ensemble CJ_i , dont le contenu est fonction de la combinaison choisie de modules alternatifs, regroupe les composants de jonction nécessaires à la fabrication du produit fini PF_i . Les composants de jonction sont nécessairement identifiés en dernière étape de configuration d'où le terme de *hierarchical pseudoitem configuration* utilisé par les auteurs pour qualifier leur méthode. Cette décomposition des produits finis en une combinaison de *pseudoitems* répond à l'objectif de définir la faisabilité d'une commande client par rapport à la disponibilité de chaque *pseudoitem*. La planification de la production s'appuie sur une hypothèse de connaissance des structures de la demande de chaque fonction y compris celle relative aux composants de jonction. Le PDP est donc défini pour chaque *pseudoitem*. Les auteurs proposent, sans rentrer dans le détail, de gérer l'incertitude sur la demande prévisionnelle en majorant les quantités du PDP.

La planification de la production basée sur l'approche de Bertrand et al. (2000) se heurte au même problème que celui identifié pour les nomenclatures de planification virtuelles. En effet, le nombre de *pseudoitems* relatifs aux composants de jonction peut être très grand ce qui remet en cause l'hypothèse de connaissance de la structure de demande prévisionnelle. Néanmoins, la vision séparée des composants de jonction du reste des composants ouvre la

voie à une possible gestion, elle aussi séparée, entre composants de jonction et modules alternatifs.

En définitive, deux approches sont envisageables pour la gestion des besoins en composants de jonction dans le cas d'une production fortement diversifiée en présence de composants de jonction.

- La première consiste à construire une demande prévisionnelle des composants de jonction à partir d'une nomenclature de planification. Le PDP est alors exprimé à un niveau de combinatoire qui permet de déduire les besoins de l'ensemble des composants de jonction ; le niveau du PDP peut alors être celui des produits finis. Le passage d'une nomenclature de planification à une prévision plus fine s'appuie sur une interprétation plus ou moins fiable des informations de la demande exprimée au niveau des modules alternatifs. L'interprétation tente de respecter la structure de la demande, fournie généralement par le commerce, et les corrélations entre les modules. Dans cette première approche, le risque d'erreur sur la prévision est important et difficilement prévisible compte tenu de la forte diversité. Une mauvaise prévision peut engendrer une rupture de stock qui elle-même peut provoquer une replanification pour tenir compte des composants manquants. D'autre part, l'interprétation de la demande commerciale peut être à l'origine d'une déformation des nomenclatures de planification. Dans l'hypothèse d'une demande commerciale fiable, la déformation des nomenclatures de planification augmente le risque d'être confronté à une demande réelle éloignée de la prévision commerciale déformée. Là aussi, l'ajustement des prévisions conduit à une replanification. Une description des phénomènes décrits dans ce paragraphe sont développés dans le §4.
- La seconde consiste à isoler la gestion des composants de jonction de celle des modules alternatifs. Dans cette approche, il s'agit d'exploiter au mieux la demande commerciale sans que celle-ci ne soit altérée par une quelconque interprétation. Pour la gestion des composants de jonction, deux situations sont à distinguer en fonction de la position du PPC. Si le PPC est inclus dans l'horizon gelé, la demande en composants de jonction est certaine puisque issue de commande réelle exprimée sur des produits finis. Par contre, si le PPC est en dehors de l'horizon gelé, la demande est incertaine et la gestion des composants de jonction doit s'appuyer sur des modèles de pilotage qui intègrent la gestion de l'incertitude.

3.2. Particularité des nomenclatures chez Renault

Renault a fait le choix de définir un PDP au niveau des produits finis notamment pour pouvoir gérer plus facilement les composants de jonction. Un véhicule Renault n'est pas que la réunion de composants rentrant dans la fabrication des modules alternatifs qui le constitue ; c'est aussi un ensemble de composants de jonction permettant d'assurer la cohérence technique de certaines combinaisons de modules alternatifs. Comme évoqué plus haut, la non-standardisation de ces composants pose le problème de leur gestion au niveau de la planification et des approvisionnements. La réponse apportée par Renault consiste à transformer la demande commerciale en une prévision en véhicules, décrits unitairement sur l'ensemble de leurs composants, permettant une gestion classique des approvisionnements avec un PDP décrit au niveau des produits finis.

La *documentation* chez Renault est le terme qui désigne l'organisation des nomenclatures établies conjointement par l'ingénierie, pour la partie technique, et le marketing pour la partie offre commerciale (versions, options, packs...). La vision classique en graphe de la nomenclature n'est pas celle qu'on retrouve dans la documentation Renault. Le couplage de deux modules ne faisant pas toujours appel au même composant de jonction malgré une même fonctionnalité, la notion de *cas d'emploi* a été introduite pour permettre d'identifier de manière univoque le lien entre un composant et l'ensemble des produits finis qui l'utilise ; nous proposons l'appellation de *nomenclature inverse* pour caractériser ce lien qui va du composant vers le composé¹. Les liens de nomenclature inverse sont établis à l'aide d'expressions logiques précisant la combinaison des critères d'objets faisant appel à un composant donné. Un composant nécessaire à la combinaison du module A_3 avec le module B_1 a comme cas d'emploi l'expression suivante $A_3 \wedge B_1$. Un composant nécessaire à la combinaison du module A_1 avec le module B_3 et la combinaison du module A_2 avec le module B_3 a comme cas d'emploi l'expression suivante $B_3 \wedge (A_1 \vee A_2)$ ².

¹ On retrouve ici la démarche du *pegging* est qui consiste à retracer les liens de nomenclature du niveau le plus haut vers le niveau le plus bas (produit fini).

²La vision en nomenclature inverse exige un effort de maintenance des bases de données non négligeable. Pour éviter les problèmes de pollution de bases de données, les cas d'emplois doivent être à jour, compacts et non-redondants.

Dans la terminologie Renault, un *objet*¹ est un élément caractéristique d'un véhicule (type de moteur, type de toit, teinte...). Chaque objet se décline en *critères*² qui représentent les valeurs pouvant être prises par un objet (par exemple toit ouvrant manuel, toit ouvrant électrique ou toit tôle pour l'objet « toit »). Pour un *modèle de véhicule* donné, seuls certains objets et critères suffisent à caractériser complètement un véhicule (le critère « 5 portes » de l'objet « caisse » n'est pas actif pour le modèle Twingo qui n'existe qu'en 3 portes). Pour la définition d'un véhicule, chaque objet actif pour le modèle se voit attribuer un et un seul critère (une voiture ne peut pas à la fois avoir un toit ouvrant et un toit tôle). L'ensemble des combinaisons résultant du choix d'un critère pour chaque objet constitue la *diversité potentielle* produit. Cette diversité se calcule en faisant le produit des cardinalités des objets. En assimilant un objet à un ensemble de modules alternatifs et en reprenant les notations du §3.1, la diversité potentielle est alors de : $\prod_{k \in \{A, B, \dots, M\}} \text{card}(k)$. L'existence d'incompatibilités

entre certains critères d'objets différents et la prise en compte isolée des objets de différenciation retardée ont pour conséquence de réduire la diversité potentielle pour aboutir à une *diversité effective*. Les incompatibilités entre critères peuvent être d'ordre techniques, auquel cas elles s'appliquent à l'ensemble des véhicules du modèle considéré et il est de la responsabilité de l'ingénierie de les renseigner. Elles peuvent être d'ordre commercial et s'appliquer de manière non-homogène à un même modèle en fonction des marchés de commercialisation. Ces dernières contraintes définissent l'offre commerciale. La diversité véhicule étant impossible à énumérer sous la forme d'une liste exhaustive, Renault a développé une représentation s'appuyant sur une structure datée de matrices booléennes³ qui intègrent les relations entre les critères. Cette modélisation, une fois réalisée, permet de savoir si un véhicule faisant appel à une certaine combinaison de critères est fabricable ou pas⁴.

En respect des liens entre critères consignés dans la structure représentant la diversité, un *véhicule complètement défini (VCD)* est une des combinaisons, faisables à un instant donné, de critères recouvrant l'ensemble des objets associés à un modèle de véhicule. Un

¹ Dans un vocabulaire plus générique, un objet est un ensemble de modules alternatifs exclusifs entre eux.

² Dans un vocabulaire plus générique, un critère est l'un des modules alternatifs appartenant à un ensemble de modules alternatifs exclusifs entre eux.

³ Nous ferons appel, sous différentes formes, à ce réseau matriciel en Chapitre V pour modéliser les contraintes documentaires.

⁴ Ce problème NP-complet est connu sous le nom de *boolean SATisfiability problem (SAT)*. Sa résolution s'appuie ici sur une exploration linéaire d'un arbre dont le temps de construction est non polynomial.

VCD n'a pas d'existence physique mais il est le reflet de ce que pourrait être un véhicule réel produit à une date donnée ; il peut être alors qualifié de véhicule virtuel.

La construction des programmes de production se fonde sur cette notion de VCD. La demande commerciale, exprimée au départ sur les critères de quelques objets, est progressivement enrichie et combinée pour finalement aboutir à un plan de production où des VCDs sont agencés sur un horizon de six mois. Les besoins bruts en composants sont déduits du PDFV grâce aux cas d'emploi spécifiques à chaque pièce. Un cas d'emploi est une expression logique de critères associé à un composant. Lorsqu'il est compatible avec la combinaison de critère d'un VCD, ce dernier est traduit en un besoin en composant correspondant au coefficient de monte. Sur une période donnée, tous les VCD, dont les expressions logiques de critère vérifient le cas d'emploi d'un composant, sont traduits en besoins bruts selon le coefficient de monte associé. Les besoins nets puis lesancements, ou *demandes de livraison*, sont calculés selon les mécanismes classiques de la MRP.

Cette vision du PDP en VCD, rassurante pour les opérationnels, donne l'illusion d'avoir affaire à une prévision concrète et certaine de la production à moyen terme. Une démarche de planification au niveau des VCD reste envisageable sur le court terme avec des niveaux élevés de remplissage des carnets de commande et une connaissance fine des contraintes permettant d'ordonner la production. Les VCD sont alors des véhicules réels commandés. Les conditions de stabilité n'étant pas réunies à moyen terme, les modifications dans les programmes de production deviennent inévitables et provoquent des replanifications génératrices de perturbations à l'origine de l'ECF en CL - amont. L'instabilité des programmes de production, sans conséquence sur tout ce qui est systématiquement monté sur les véhicules, génère une perte chronique dans l'efficacité et l'efficience de la gestion des approvisionnements en composants de modules alternatifs et de jonction.

Les mécanismes à l'origine des perturbations, évoquées dans le paragraphe précédent, seront décrits dans le §4.

4. Origines de l'ECF en CL - amont

Dans le chapitre II, nous avons relevé le fait que très peu d'articles se sont penchés sur la problématique de la variabilité de la demande en CL - amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés. La CL-amont, de par sa particularité, est soumise à

des phénomènes de variation qui se distinguent des effets habituellement rencontrés en CL - aval.

S'inspirant des pratiques dans l'industrie automobile, Childerhouse et al. (2008) établissent le lien de cause à effet entre l'instabilité des programmes de production, repérés dans la littérature par le terme de nervosité (Blackburn et al., 1985), et les phénomènes d'oscillations croissantes générés en conséquence le long de la CL - amont (Cf. Figure III- 2). Le cercle vicieux qui est décrit a pour point de départ la déclinaison de la demande commerciale qui spécifie la façon dont laquelle la demande commerciale est interprétée pour construire le PDP. L'horizon de planification qui se situe au-delà de l'horizon gelé contient des informations non-certaines naturellement susceptibles de varier à l'occasion d'un nouveau calcul de PDP. Si ces variations sont non maîtrisée, du fait de politiques de sécurisation inadéquates, ou qu'elles sont exacerbées, par des logiques de prévision à des niveaux de nomenclature trop bas, comme évoqué dans le §3, la boucle du cercle vicieux se referme induisant de nouvelles variations au niveau du PDP. Ce mécanisme constitue l'hypothèse centrale de la thèse sur l'origine de l'ECF en CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés.

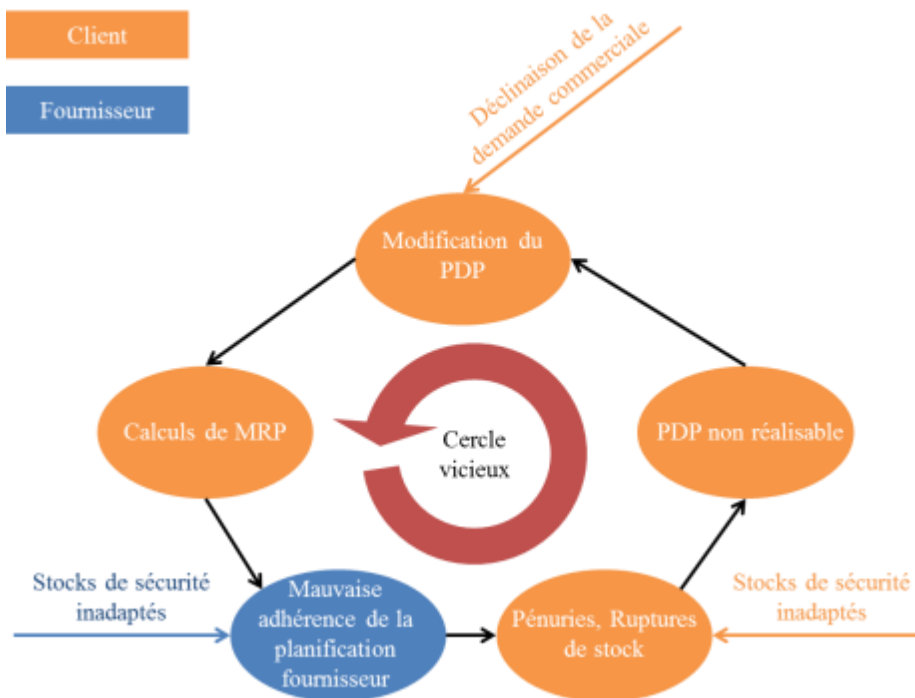


Figure III- 2 : Cercle vicieux de (Childerhouse et al., 2008)

La Figure III- 3¹ illustre comment une succession de cercles vicieux s'articule pour générer un ECF en CL - amont. Une instabilité du PDP, au niveau du maillon qui tire la demande, perturbe celui de son fournisseur de premier rang et ainsi de suite avec les fournisseurs de rangs supérieurs. Dans le meilleur des cas, cette situation se solde par une accumulation de stocks inutiles formés par des demandes revues à la baisse ou carrément annulées. Lorsqu'il faut satisfaire des demandes non prévues, la mobilisation de moyens de dépannage d'urgence est envisagée pour éviter un arrêt de la production et une reprogrammation qui risque de déclencher un nouveau cycle vicieux. La propagation en cascade de ces perturbations, non sans conséquence sur les coûts de gestion, génère un sentiment de défiance chez les acteurs de la CL qui se traduit dans les faits par des réactions locales inadaptées (stockage excessif et quantités commandées excessives). Ces réponses inappropriées sont génératrices de coûts inutiles et parfois invisibles² qui dégradent durablement la performance de la CL - amont.

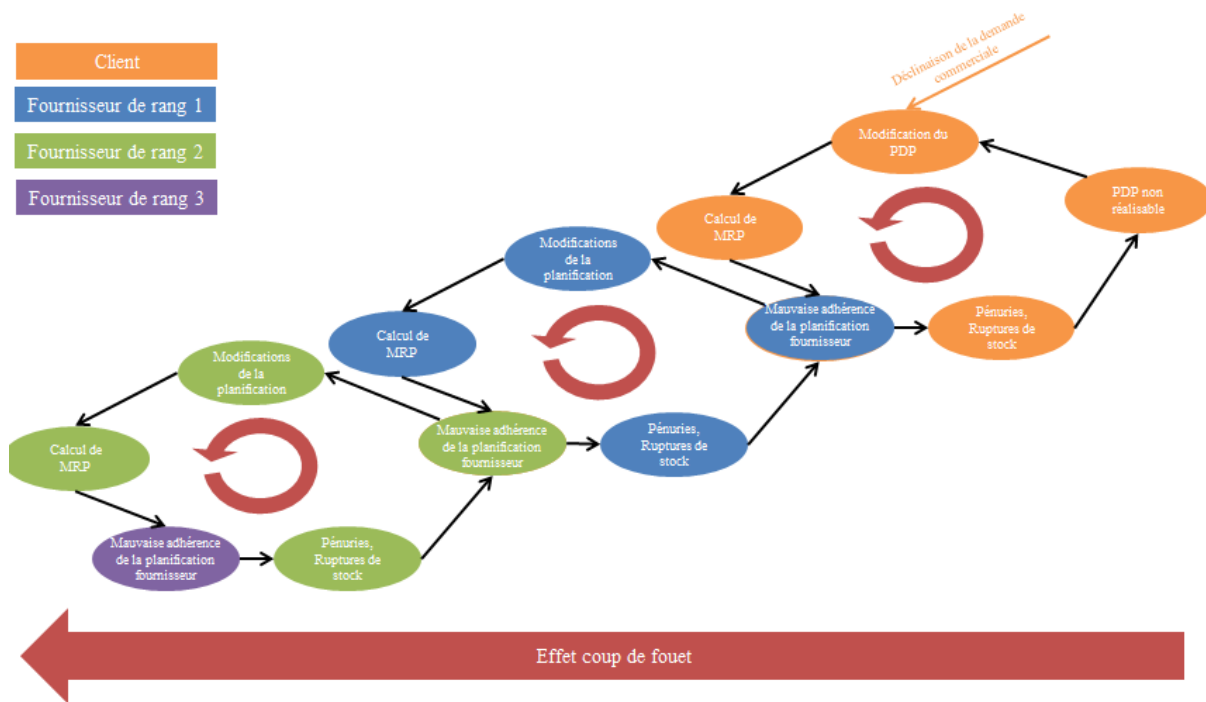


Figure III- 3 : ECF en CL - amont

¹ L'adoption ici d'une structure de CL en série ne prétend pas refléter une réalité beaucoup plus complexe.

² Le coût imputable au sur-stockage est généralement répercuté sur les coûts d'achat dont le client ignore la structure.

Conclusion

Le cadre de référence de la recherche permet de mieux cerner le contexte dans lequel sera menée l'analyse des causes de variabilité de la demande et dans lequel seront développées les solutions alternatives pour une meilleure maîtrise du pilotage des flux-amont.

Le pilotage des flux-amont s'appuie sur une planification de type MRP qui mobilise les deux mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais pour le calcul des lancements en production. Actuellement, l'information sur la demande prévisionnelle est transmise aux partenaires de la CL - amont sans pour autant qu'il n'y ait de préconisation précise sur le mode d'exploitation de cette information qui est naturellement susceptible de varier dans le temps.

En production de masse de produits fortement diversifiés, l'organisation des nomenclatures joue un rôle essentiel dans le mode d'exploitation des informations prévisionnelles. Le choix de piloter les flux-amont au niveau des produits finis résout, *a priori*, le problème posé au niveau des composants de jonction, mais pose la question de l'interprétation de la demande commerciale. La forte diversité augmente les chances de voir les prévisions exprimées à un niveau trop bas de la nomenclature varier à l'occasion des mises à jour du PDP à l'origine de l'ECF en CL - amont.

Dans la deuxième partie de ce document, nous tenterons de valider l'hypothèse formulée dans le §4 et de mettre en évidence les causes d'instabilité du PDP et de déformation de la demande commerciale dans le modèle de planification utilisé par Renault.

DEUXIÈME PARTIE

**MÉCANISMES A L'ORIGINE DE LA VARIABILITÉ DE LA
DEMANDE PRÉVISIONNELLE ET DE LA DÉFORMATION
DE LA DEMANDE COMMERCIALE**

CHAPITRE IV

GENÈSE ET MESURE DE LA VARIABILITÉ DES PRÉVISIONS DE LA DEMANDE INDUITE PAR LE MODÈLE DE PLANIFICATION DE RENAULT

Introduction

Le processus qui est à l'origine des lancements en production ou en approvisionnement est des plus complexes et concerne plusieurs métiers parmi lesquels on retrouve la production, la logistique, l'ingénierie, le commerce et le marketing. L'analyse de ce processus, aux multiples interfaces, a pour but de mettre en évidence les causes structurelles de variabilité des demandes de livraisons prévisionnelles qui provoquent l'instabilité des PDP. Selon notre hypothèse de recherche, le processus de déclinaison de la demande commerciale en plan directeur de production de véhicules, puis en demandes de livraison, est un élément qui vient exciter le cercle vicieux à l'origine de l'ECF en CL d'approvisionnement (Cf. Figure III- 2). Avant de s'attaquer de front à l'analyse des étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale, cette hypothèse doit être confortée en vérifiant sur un cas réel l'existence de phénomènes de variabilité croissante lors de l'interprétation de la demande commerciale.

Nous commencerons par décrire le fonctionnement global du modèle d'approvisionnement de Renault. Dans le §2, nous présenterons les mesures de variabilité en cascade qui mettent en évidence l'existence des perturbations qui viennent amorcer le cycle illustré par la Figure III- 2 et qui justifient l'analyse fine des étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale engagée en chapitre V.

1. Modèle de planification et de gestion des approvisionnements Renault

Le modèle d'approvisionnement regroupe l'ensemble des étapes visant à réaliser des lancements en production à partir d'une demande commerciale. Deux processus majeurs sont au cœur du modèle d'approvisionnement et se distinguent par leurs périmètres organisationnels et leurs fondements méthodologiques. Le premier processus est celui de la déclinaison de la demande commerciale en prévision de demande de véhicules. Associé, d'un

point de vue organisationnel, au service planification, il fait appel à des méthodes de programmation mathématique pour résoudre en cascade une série de problèmes d'optimisation. Le deuxième processus est celui du calcul et d'expression des besoins qui s'alimente des sorties du processus précédent. Associé, d'un point de vue organisationnel au service de gestion de la production, il mobilise des mécanismes de type MRP pour le calcul desancements en production.

En reprenant notre problématique de départ, nous tentons, à travers l'analyse de ce modèle, de répondre aux trois questions suivantes :

- À chaque étape, le processus de déclinaison de la demande commerciale distord-t-il l'information de référence sur la demande prévisionnelle ? Si oui, quelle sont, à chaque étape de ce processus, les facteurs de déformation de cette demande prévisionnelle ?
- Dans leur exécution dynamique, les étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale fournissent-elles des prévisions stables au sens de la variabilité ?
- Comment le processus de calcul et d'expression des besoins répond-il à la variabilité générée par le processus de déclinaison de la demande commerciale ?

Si les étapes successives du processus de déclinaison de la demande commerciale contribuent à déformer la demande commerciale, information de référence sur la demande à venir, cela peut générer des programmes de production incohérents avec les ordres de fabrication remontés par le réseau commercial¹. Une modification des programmes de production est alors nécessaire, enclenchant le cercle vicieux décrit en fin de chapitre III. Si, de plus, les programmes de production, générés à l'occasion de différents cycles d'exécution du processus dans une logique glissante de la planification, présentent de grands écarts malgré une demande commerciale stable, le mécanisme à l'origine de l'effet illustré par la Figure III-2 agira à chaque cycle de programmation. Les conséquences que peut avoir la modification d'un plan directeur de fabrication de véhicules dépendent de l'efficacité du processus de calcul et d'expression des besoins.

Le processus de déclinaison de la demande commerciale se décompose en 5 sous-processus majeurs : construction de la réponse industrielle à la demande commerciale, découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale, construction des prévisions en versions, construction des prévisions en véhicules complètement définis et construction du

¹ Nous partons du principe que la demande commerciale est l'information de référence qui reflète le mieux la demande à venir.

plan directeur de fabrication de véhicules. Les sorties de chaque sous-processus sont des prévisions décrites à des niveaux de nomenclature plus ou moins élevés et agrégées selon un découpage temporel plus ou moins fin. L'agencement séquentiel de ces sous-processus et l'inexistence de boucles de rétroaction, remettant en cause les résultats obtenus en amont, autorise une décomposition du diagnostic elle aussi séquentielle.

Le plan directeur de fabrication de véhicules, en sortie du dernier sous-processus, représente l'information principale en entrée du processus de calcul et d'expression des besoins.

La Figure IV- 1 représente une cartographie simplifiée des deux processus auxquels on s'intéresse : sur fond rouge la déclinaison de la demande commerciale et sur fond orange le calcul et expression des besoins.

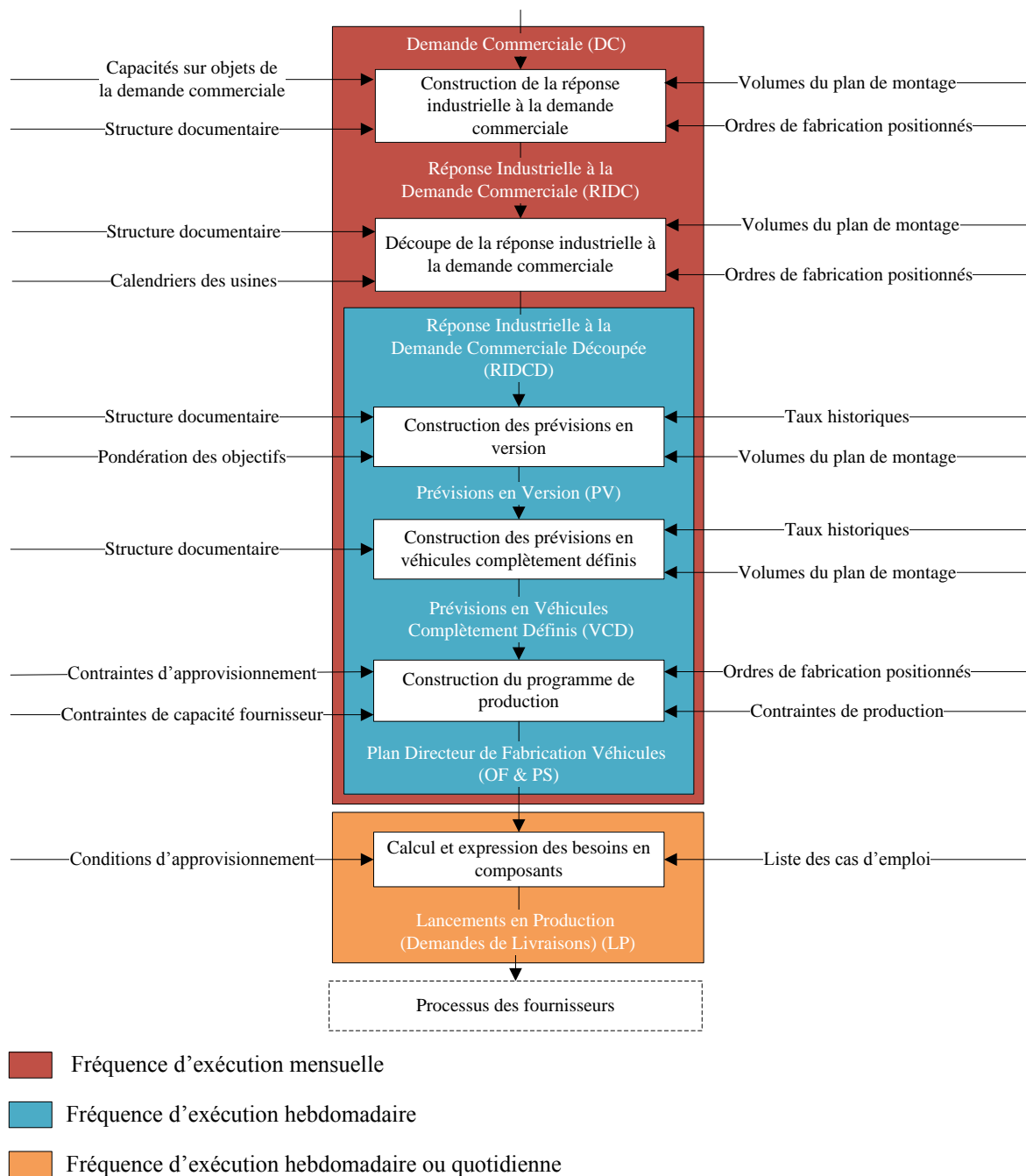


Figure IV- 1 : Processus de déclinaison de la demande commerciale en plan directeur de fabrication véhicules et calcul et expression des besoins

Dans le §2, nous présenterons les résultats de mesures de variabilité de la demande au niveau de chaque sous-processus obtenus sur un exemple réel.

2. Mesure de la variabilité des prévisions de la demande

Le modèle de planification utilisé par Renault sert à la construction du PDFV dont les informations sont transmises aux fournisseurs sous forme de demandes de livraisons fermes et prévisionnelles. La mesure de la variabilité des prévisions de la demande sur un cas réel vise à confirmer la pertinence des deux premières interrogations formulées dans le §1 et à justifier l'étude fine du processus de déclinaison de la demande commerciale menée en chapitre V.

Nous commencerons par définir l'indicateur qui sera utilisé pour la mesure de la variabilité. Dans le §2.2, afin d'éviter les emplois inopportuns de l'indicateur, nous présenterons les limites de son utilisation et de son interprétation. Dans le §2.2, nous présenterons les résultats des mesures de variabilité réalisées sur un cas réel.

2.1. Indicateur de variabilité

La mesure de l'instabilité des prévisions est un élément essentiel à la saisie des phénomènes qui en sont à l'origine. La littérature sur l'ECF établit un large consensus sur la métrique retenue pour la mesure de l'amplification de la variation de la demande en remontant la CL de l'aval vers l'amont. L'indicateur utilisé est celui du rapport entre l'écart-type de la demande exprimée en sortie et l'écart-type de la demande enregistrée en entrée de chaque maillon de la CL. Une valeur supérieure à 1 de ce rapport indique un accroissement de la variance de la demande ce qui montre l'existence d'un ECF. D'un point de vue opérationnel, cet indicateur présente un certain nombre d'inconvénients résumés par les points suivants.

- Le rapport des écarts-types n'a de sens que dans une CL en série où les flux-amont et les flux-aval au niveau d'un même maillon sont de même nature. Dans le cas d'une CL avec un fournisseur commun à plusieurs clients, cette métrique ne peut s'appliquer du fait des phénomènes de compensation pouvant intervenir entre les demandes exprimées par chaque client.
- Dans un modèle de planification, les informations du programme directeur des derniers maillons productifs sont celles qui tirent la demande le long de la CL. L'exploitation de ces informations passe par l'application des mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption par les délais. À un instant donné, la demande exprimée par un maillon s'appuie sur des informations décalées dans le temps par rapport à celles utilisées par son

client pour lui transmettre sa propre demande. Dans l'utilisation du rapport des écarts-types, cette prise en compte des décalages par les délais n'est pas décrite.

- D'un point de vue pratique, la mesure en cascade d'un rapport d'écarts-types nécessite un accès aux commandes émises par chaque acteur de la CL, ce qui n'est pas toujours possible dans la réalité.
- La mesure d'un rapport d'écart-type indique la présence d'un ECF mais ne donne aucune piste sur l'origine de ce phénomène.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, nous proposons d'utiliser un indicateur de nature différente dont l'objet est non pas d'identifier la présence d'un effet d'amplification de variance de la demande, mais de mesurer l'ampleur des modifications du PDP qui sont à l'origine des perturbations décrites par Childerhouse et al. (2008). En faisant cela, nous nous rapprochons de l'objectif de l'étude énoncé dans le §1.2 du chapitre I. Il s'agira plus précisément de capter les variations introduites par les différentes couches de prévisions que comporte le modèle de planification de Renault. Nous faisons l'hypothèse que des variations de la demande prévisionnelle non maîtrisés engendrent forcément des perturbations le long de la CL - amont comme illustré par la Figure III- 3.

L'indicateur que nous utilisons, dans le cadre de cette étude, correspond à une mesure de variation relative moyenne entre une ou plusieurs prévisions et une valeur de référence. Il s'inspire de l'indicateur de variabilité moyenne pondérée développé par Kadipasaoglu et Sridharan (1997) et correspond à la recommandation GALIA (Groupement pour l'amélioration des Relations dans l'Industrie Automobile) pour la mesure de la stabilité de la prévision. Nous proposons de garder l'appellation existante de *Forecast Accuracy Index (FAI)* pour cet indicateur.

Le calcul d'un FAI peut se faire dès lors qu'on est en possession d'une valeur de référence et d'au moins une valeur correspondant à une prévision de la valeur de référence. Le FAI peut être mesuré à différents niveaux du processus de déclinaison de la demande commerciale pour rendre compte de la tendance haussière, baissière ou stationnaire de la variabilité de la demande au fur et à mesure qu'on affine la prévision.

Pour comprendre le mode de calcul du FAI, illustrons une mesure de variabilité au niveau des prévisions de la demande issues du PDFV, dernière étape du processus de déclinaison de la demande commerciale, pour un composant i .

Soient les notations suivantes :

H_P : horizon de planification

H_G : horizon gelé

$x_{i,t'}^t$: prévision de la demande du composant k pour la période t' calculée en début de période t avec $t+H_G-1 \leq t' \leq t+H_P-1$

H : nombre de périodes de calcul

Dans ces conditions, $FAI_{i,t'}^t = \sum_{h=1}^H \frac{|x_{i,t'}^t - x_{i,t'}^{t-h}|}{H \times x_{i,t'}^t}$ avec $H \leq H_P - H_G - 1$. Lorsque la valeur

de référence est une quantité certaine incluse dans l'horizon gelé, il convient de remplacer $x_{i,t'}^t$ par $PDFV_{i,t'}^t$. Avec $t' = t + H_G - 1$, la relation à utiliser pour le calcul du FAI est alors :

$$FAI_{i,t+H_G-1}^t = \sum_{h=1}^H \frac{|PDFV_{i,t+H_G-1}^t - x_{i,t+H_G-1}^{t-h}|}{H \times PDFV_{i,t+H_G-1}^t} \text{ avec } H \leq H_P - H_G.$$

Pour illustrer le calcul du FAI, considérons les prévisions du tableau ci-dessous issues de 10 calculs successifs de PDP pour un composant i . L'horizon de planification est de 8 périodes et l'horizon gelé est de 2 périodes. Les quantités certaines sont en caractère rouge.

		Horizon de calcul																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Période de calcul	1	116	105	99	109	92	96	108	101									
	2		105	92	105	93	79	102	99	112								
	3			92	77	111	115	114	108	79	103							
	4				77	92	89	108	97	88	122	101						
	5					92	98	111	98	92	118	100	106					
	6						98	112	110	107	119	102	104	89				
	7							112	92	117	117	91	90	103	96			
	8								92	94	103	121	108	79	108	98		
	9									94	110	119	104	82	89	98	116	
	10										110	93	100	111	89	84	98	99
FAI								11%	14%	8%	14%							

Tableau IV- 1 : Exemple de calcul de FAI

Le calcul de FAI pour la période 11, réalisé en période 10 et exprimé en pourcentage dans le Tableau IV- 1, utilise comme valeur de référence la dernière valeur intégrée dans l'horizon gelé en période 10 (repérées en caractère gras) et les prévisions calculées avant la période 10 pour la période 11 (repérées dans des cellules en fond bleu). Le calcul est le

$$\text{suivant : } FAI_{i,11}^{10} = \frac{|93-119|+|93-121|+|93-91|+|93-102|+|93-100|+|93-101|}{6 \times 93} = 14\%$$

2.2. Limites d'interprétation et de mesure du FAI

Dans l'absolu, l'interprétation de la valeur que prend un FAI est difficile car les prévisions sont, par définitions, susceptibles de varier à l'occasion de leur mise à jour. L'utilisation de cet indicateur n'a de sens que dans une logique de comparaison des différentes mesures réalisées à différents niveaux du processus de déclinaison de la demande commerciale.

Pour comparer des valeurs de FAI, il faut que le périmètre de mesure soit le même pour chaque calcul. Le périmètre est à la fois temporel, car à un calcul on associe une période, et physique car les prévisions concernent des composants. L'hétérogénéité des périmètres temporel et physique des étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale réduit le champ d'application de la démarche de comparaison des FAI.

La demande commerciale et la réponse industrielle à la demande commerciale sont toutes deux exprimées selon un découpage mensuel de l'horizon de planification. Un FAI calculé sur une base mensuelle n'est pas comparable à un FAI calculé sur une base hebdomadaire pour les autres étapes du processus.

D'autre part, tous les composants ne peuvent faire l'objet d'une mesure de FAI à chaque niveau du processus. Les prévisions sur les composants de jonction n'apparaissent qu'à partir du sous-processus de construction des prévisions en version (Cf. Figure IV- 1).

2.3. Résultats des mesures de variabilité sur un exemple réel

Pour la mesure des FAI, nous avons retenu une population de 212 composants approvisionnés par une UCM européenne qui assemble un modèle de véhicule fortement demandé. Les raisons de ce choix sont essentiellement la stabilité de l'offre commerciale de ce modèle qui n'a pas connu de grands changements sur les périodes étudiées.

Pour constituer des périmètres comparables, nous avons regroupé les composants en trois catégories. La première catégorie est celles des composants directement liés à des objets sur lesquels s'exprime le commerce. La deuxième catégorie regroupe les composants dont les cas d'emploi font référence à une combinaison d'objets issus de la demande commerciale. La troisième catégorie rassemble les composants dont les cas d'emploi font référence à un niveau

de combinatoire incluant des objets non pris en compte par la demande commerciale. Les composants des catégories 1 et 2 sont des composants de jonction¹.

Pour chaque catégorie nous avons calculé un FAI moyen pour la semaine 47 de l'année 2011. Le film ferme de Renault étant d'une semaine, correspondant à l'horizon gelé, le calcul pour la semaine 47 de l'année 2011 a été réalisé en semaine 46 de la même année.

Les historiques disponibles permettent de remonter à l'ensemble des prévisions réalisées pour la période retenue. L'horizon de planification étant de 6 mois, pour chaque calcul de FAI nous disposons, au minimum, de $H_P - H_G = 24 - 1 = 23$ prévisions à rapporter à la quantité certaine de la semaine de l'horizon gelé.

Les résultats du calcul de FAI sont regroupés dans le tableau ci-dessous. Lorsqu'une catégorie est non éligible au calcul de FAI à une étape du processus de déclinaison de la demande commerciale, la cellule est grisée. Autrement, la valeur contenue dans une cellule correspond à la moyenne du FAI de la catégorie de composants calculée à une certaine étape du processus.

		Catégories de composants		
		1	2	3
Nombre de composants par catégorie		113	132	77
Étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale	Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale			
	Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale	13%		
	Construction des prévisions en version	23%	29%	
	Construction des prévisions en véhicules complètement définis	32%	40%	44%
	Construction du plan directeur de fabrication de véhicules	33%	45%	52%

Tableau IV- 2 : FAI moyen par catégorie de composant

La lecture en colonne du Tableau IV- 2 montre que, pour toutes les populations de composant, le FAI moyen augmente systématiquement au fur et à mesure que l'on avance dans le processus de déclinaison de la demande commerciale.

¹ Nous avons exclu de notre population les composants systématiquement montés sur les véhicules du modèle retenu pour l'analyse, sans grand intérêt dans notre démarche.

En restant sur un même périmètre physique et temporel, cette observation indique que, pour un niveau de variabilité en entrée, l'interprétation de la demande commerciale tend à accroître cette variabilité rendant instable la demande prévisionnelle transmise aux fournisseurs.

Conclusion

Les mesures de FAI réalisées sur une population de composants ont révélé l'existence d'un phénomène d'amplification de la variabilité des prévisions au fur et à mesure qu'on pousse l'interprétation de la demande commerciale vers des niveaux de nomenclature élevés.

Il est évident qu'une généralisation du constat révélé par ce chapitre n'est pas envisageable à ce niveau du diagnostic. L'objet du chapitre V est de décortiquer le fonctionnement algorithmique de chaque étape du processus de déclinaison de la demande commerciale afin d'identifier les mécanismes qui sont à l'origine des perturbations introduites par chaque sous-processus. La modélisation séquentielle des phases de déclinaison de la demande commerciale doit permettre de simuler, en environnement contrôlé, leur comportement et d'isoler les causes qui sont à l'origine des perturbations enregistrées dans le §2.

CHAPITRE V

ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Introduction

Les mesures de FAI ont révélé que, sur une population de composants, le processus de déclinaison de la demande commerciale tend à accroître la variabilité des prévisions. L'analyse des étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale doit nous permettre de confirmer ce résultat et d'identifier les causes qui en sont à l'origine.

Les systèmes d'information qui supportent le processus de déclinaison de la demande commerciale sont d'une grande complexité et ne sont pas tous dotés d'un info-service permettant de récupérer facilement les données d'entrée, de sortie et les paramètres associés à chaque sous-processus. Ajoutée à cela, l'impossibilité de les faire fonctionner en « mode simulation » ne permet pas d'identifier de manière isolée les causes qui sont à l'origine des variations amplifiées révélées par les mesures de FAI.

Afin d'identifier et d'isoler les facteurs de variabilité et de déformations de l'information commerciale de référence, nous nous proposons, en première partie de ce chapitre, de reconstituer le fonctionnement de chaque étape du processus étudié¹. La modélisation qui en résulte autorise à réaliser les tests et les simulations, en environnement contrôlé, permettant d'isoler les causes de variabilité de la demande prévisionnelle et de distorsion de l'information commerciale. Cette procédure nous aidera à répondre aux deux premières interrogations formulées dans le §1 du chapitre IV. La complexité du processus auquel on s'intéresse appelle à une approche cartésienne de décomposition en sous-processus. Cette démarche est particulièrement bien adaptée à l'organisation séquentielle de la déclinaison de la demande commerciale chez Renault (Cf. Figure IV- 1).

En deuxième partie de chapitre, nous examinerons le processus de calcul des besoins et d'émission des demandes de livraison. Ce processus, alimenté par le processus de déclinaison

¹ La reconstitution s'appuie essentiellement sur les informations contenues dans les cahiers des charges fonctionnels et techniques qui ont servi au développement informatique des applications qui supportent les étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale. Avant utilisation, la modélisation du processus de déclinaison de la demande commerciale a été présentée et validée par les experts métiers associés à chaque étape du processus.

de la demande commerciale, est à l'origine des informations tactiques et opérationnelles que partage Renault avec ses fournisseurs. Il est aussi le siège des mesures mises en place afin de limiter les conséquences de la variabilité de la demande prévisionnelle. L'analyse de ce processus nous aidera à répondre à la troisième interrogation posée dans le §1 du chapitre IV.

1. Processus de déclinaison de la demande commerciale en prévisions de demande de véhicules

Dans cette partie, nous commencerons par proposer des modélisations intégrant les principes de fonctionnement fondamentaux de chaque sous-processus. Un exemple d'illustration, mené de bout en bout du processus, aidera à une meilleure appréhension des formats de données utilisés dans le processus de déclinaison de la demande commerciale.

Dans le §1.2, nous procéderons à une série de simulations, sur des scénarios construits à partir de données fictives, permettant d'isoler les facteurs de déformation et de variabilité de la prévision introduits par chaque sous-processus. Toute chose étant égale par ailleurs, chaque cause potentielle de variabilité ou de déformation sera testée sur un ou plusieurs scénarios.

1.1. Modélisation des sous-processus de déclinaison de la demande commerciale

Pour chaque sous-processus, nous évoquerons ses principes de fonctionnement avant de passer à sa modélisation. La modélisation est testée sur exemple numérique qui permet d'apprécier le résultat d'une simulation sur un scénario de référence. Chaque sous-processus fait l'objet de commentaires qui orienteront la construction des scénarios simulés dans le §1.2.

1.1.1. Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale

Déclenchée à une fréquence mensuelle, la construction de la réponse industrielle à la demande commerciale consiste à établir un plan industriel qui respecte un certain nombre de contraintes et qui se rapproche le plus possible des prévisions commerciales.

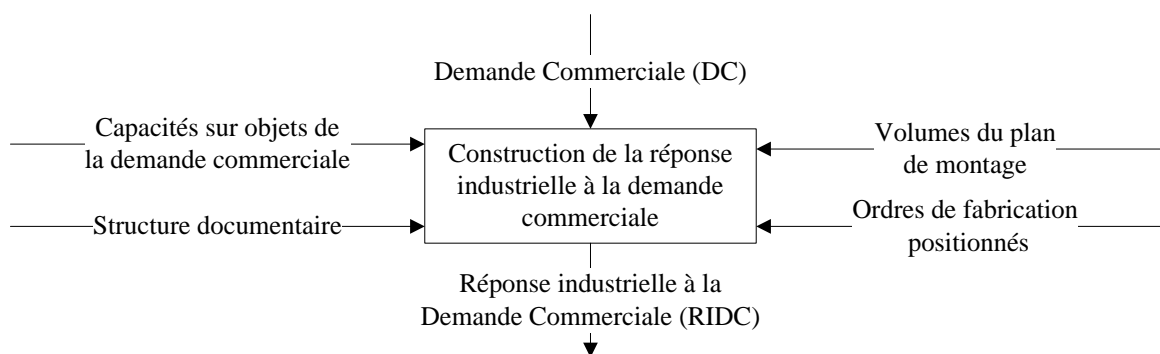


Figure V- 1 : Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale

Une fois par mois, le commerce exprime sa demande en critères d'objets majeurs sur chaque modèle de véhicule sur un horizon de six mois. Le découpage temporel de la demande correspond au mois calendaire. Les objets majeurs, qui fixent le niveau de détail de l'expression commerciale, sont choisis d'un commun accord entre industriels et commerciaux. Ils concernent généralement les prestations visibles par le client final telles que le type de caisse, la motorisation, le niveau d'équipement, le type de boîte de vitesse, etc. Les objets tels que le type de toit ou le type de radio, faisant référence à des options, sont considérés comme mineurs et sont gérés par la direction logistique¹.

La réponse industrielle à la demande commerciale se présente précisément sous le même format que la demande commerciale. Elle résulte d'une optimisation linéaire en nombres entiers par période et par objet. La somme des volumes des critères d'un même objet doit absolument être égale au volume du plan de montage. Les contraintes documentaires inter-objets doivent être strictement respectées par les volumes des critères. De plus, le volume alloué à un critère doit, dans tous les cas, être inférieur à la capacité disponible sur le critère et supérieur au volume des ordres de fabrication (OF) concernés par le critère. La capacité disponible par critère est fixée par des contraintes techniques en lien avec la fabrication. Un OF est une commande réelle que le commerce s'est engagé à satisfaire ; il est donc associé à un VCD et a comme attribut une date de fabrication souhaitée calculée selon la date de livraison promise du véhicule qui permet d'honorer une date de livraison promise du véhicule.

L'objectif de l'optimisation est de trouver une réponse industrielle qui se rapproche le plus possible de la demande commerciale dans la répartition des volumes par critères et qui

¹ Ce point sera discuté au niveau du sous-processus « construction des prévisions en véhicules complètement définis » dans le §3.1.4

respecte les contraintes industrielles (capacités, ordres de fabrication et documentation) décrites au niveau même niveau d'expression que la demande commerciale.

1.1.1.1. Modélisation

Pour cette partie, et dans le reste du chapitre V lorsque ce sera nécessaire, on adoptera les notations suivantes :

T : Nombre de périodes de l'horizon de la demande commerciale (mois calendaire)

t : Période de l'horizon de la demande commerciale (mois calendaire)

n : Nombre d'objets majeurs

i : Objet majeur i avec $i=1...n$

j_i : Critère j de l'objet majeur i avec $j_i=1...m_i$

m_i : Nombre de critères de l'objet majeur i

$DC_{j_i,t}$: Demande commerciale sur j_i pour la période t avec $t=1...T$

$RIDC_{j_i,t}$: Réponse industrielle à la demande commerciale sur j_i pour la période t , c'est la variable décisionnelle du problème

$Capa_{j_i,t}$: Capacité industrielle disponible pour j_i en période t

$OF_{j_i,t}$: Nombre d'ordres de fabrication concernés par le critère j_i placés en période t

V_t : Volume global du plan de montage en période t

$Doc_{ii',t}$: Matrice de compatibilité documentaire¹ en période t entre i et i' avec $i' < i$

$$\begin{cases} Doc_{ii',t}[j_i, j_{i'}] = 1 & \text{si } j_i \text{ et } j_{i'} \text{ sont compatibles en période } t \\ Doc_{ii',t}[j_i, j_{i'}] = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

¹ Cette matrice booléenne décrit le passage de la diversité potentielle à une diversité effective dans la combinaison des critères de deux objets. En décrivant cette restriction par paire d'objets, il y a C_2^n matrices. La résolution du problème d'optimisation relatif à l'objet i conduit à intégrer, dans le programme linéaire, les décisions antérieurement prises dans la résolution des problèmes relatifs au traitement des objets i' précédemment optimisés.

$e_{j_i,t}$: Variable d'écart absolu du critère j_i en période t avec

$$e_{j_i,t} = \max(DC_{j_i,t} - RIDC_{j_i,t}, RIDC_{j_i,t} - DC_{j_i,t})$$

$e_{i,t}^{Max}$: Variable d'écart absolu maximum des critères de l'objet i en période t avec

$$e_{i,t}^{Max} = \max_{j_i} (e_{j_i,t})$$

L'algorithme de calcul de la réponse industrielle à la demande commerciale se présente comme une séquence de résolution de problèmes linéaires en nombres entiers. La résolution se fait par objet et par période. Le résultat obtenu pour un objet i se transforme en contrainte pour l'itération suivante qui concerne l'objet $i+1$. La séquence d'optimisation, si elle est modifiée, peut générer des résultats sensiblement différents au niveau de la réponse industrielle à la demande commerciale.

1. $i=1$

2. $t=1$

3. Résoudre le PLNE de création d'une RIDC pour les critères de l'objet i pour la période t :

- $Min \left[e_{i,t}^{Max} + \sum_{j_i=1}^{m_i} e_{j_i,t} \right]$: fonction objectif visant à minimiser la somme des écarts entre $RIDC_{j_i,t}$ et $DC_{j_i,t}$, et à la lier sur les critères d'un même objet par l'introduction de $e_{j_i,t}^{Max}$.

- $e_{j_i,t} \geq RIDC_{j_i,t} - DC_{j_i,t} \forall j_i = 1 \dots m_i$

- $e_{j_i,t} \geq DC_{j_i,t} - RIDC_{j_i,t} \forall j_i = 1 \dots m_i$

- $e_{i,t}^{Max} \geq e_{j_i,t} \forall j_i = 1 \dots m_i$

- $\sum_{j_i=1}^{m_i} RIDC_{j_i,t} = V_t$: Contrainte de respect du volume du plan de montage

- $RIDC_{j_i,t} \leq Capa_{j_i,t} \forall j_i = 1 \dots m_i$: Contrainte de respect de la capacité industrielle

- $RIDC_{j_i,t} \geq OF_{j_i,t} \forall j_i = 1 \dots m_i$: Contrainte de respect du nombre d'ordres de fabrication positionnés en t

- Si $i > 1$ alors $RIDC_{j_i,t} \leq \sum_{j_{i'}=1}^{m_{i'}} RIDC_{j_{i'},t} \times Doc_{ii',t}[j_i, j_{i'}] \forall i' < i$ et $\forall j_{i'} = 1 \dots m_{i'}$:

Contrainte de respect de la cohérence documentaire avec les décisions antérieures (Cf. note en Page 76)

- $RIDC_{j_i,t} \in \mathbb{N} \forall j_i = 1 \dots m_i$: contrainte d'intégrité

4. $t = t + 1$
5. Si $t \leq T$ aller à (3) sinon aller à (6)
6. $i = i + 1$
7. Si $i \leq n$ aller à (2) sinon STOP

1.1.1.2. Illustration numérique

Par un exemple simple, construit à partir de données fictives dont l'ordre de grandeur et le format sont inspirés de situations réelles, nous illustrons le fonctionnement de cette étape. Le jeu de données a été créé de telle sorte à garantir une cohérence. Les scénarios de perturbation simulés dans le §3.2 viennent remettre en cause cette cohérence pour tester la robustesse de chaque sous-processus.

Dans cet exemple, nous retenons l'existence de deux objets majeurs : **la motorisation (Mo)** et **le niveau d'équipement (NE)**. À chaque objet, nous associons trois critères (Mo1, Mo2 et Mo3 pour la motorisation ; NE1, NE2 et NE3 pour les niveaux d'équipement). La demande commerciale et la réponse industrielle à la demande commerciale s'expriment à une maille mensuelle sur chacun de ces critères sur un horizon de six mois. Nous présentons, tour à tour, les données d'entrée, les paramètres de modélisation et le résultat de l'optimisation.

1.1.1.2.1. Données d'entrée

		Mois Calendaires					
		1	2	3	4	5	6
Motorisation	Mo1	2430	2633	2773	2423	2454	2505
	Mo2	7449	8090	8637	7385	7706	7742
	Mo3	2121	2277	2590	2192	2240	2353
Niveau d'équipement	NE1	4215	4530	4869	4184	4321	4391
	NE2	6678	7124	7719	6502	6858	6892
	NE3	1107	1346	1412	1314	1221	1317

Tableau V- 1 : Demande Commerciale (DC)

	Mois Calendaires					
	1	2	3	4	5	6
Volume du plan de montage	12000	13000	14000	12000	12400	12600

Tableau V- 2 : Volume du plan de montage (V)

		Mois Calendaires					
		1	2	3	4	5	6
Motorisation	Mo1	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	Mo2	12000	13000	14000	12000	12400	12600
	Mo3	12000	13000	14000	12000	12400	12600
Niveau d'équipement	NE1	12000	13000	14000	12000	12400	12600
	NE2	12000	13000	14000	12000	12400	12600
	NE3	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Tableau V- 3 : Capacités (Capa)

		Mois Calendaires					
		1	2	3	4	5	6
Motorisation	Mo1	1829	420	61	0	0	0
	Mo2	5519	1394	158	0	0	0
	Mo3	1619	399	36	0	0	0
Niveau d'équipement	NE1	3110	789	97	0	0	0
	NE2	4914	1237	146	0	0	0
	NE3	870	205	26	0	0	0

Tableau V- 4 : Ordres de fabrication (OF)

		Mois Calendaires					
		1	2	3	4	5	6
NE1	Mo1	1	1	1	1	1	1
	Mo2	1	1	1	1	1	1
	Mo3	0	0	0	0	0	0
NE2	Mo1	1	1	1	1	1	1
	Mo2	1	1	1	1	1	1
	Mo3	1	1	1	1	1	1
NE2	Mo1	0	0	0	0	0	0
	Mo2	1	1	1	1	1	1
	Mo3	1	1	1	1	1	1

Tableau V- 5 : Documentation (Doc)

1.1.1.2.2. Paramètres d'optimisation

Le choix de paramétrage à ce niveau du processus concerne l'ordre de passage des objets par l'optimisation. Nous supposons, dans cet exemple, que l'ordre de passage est le suivant : Motorisation, Niveau d'équipement.

1.1.1.2.3. Résultats de l'optimisation

Après application de l'algorithme présenté en modélisation, nous obtenons la RIDC telle que représentée dans le tableau ci-dessous.

		Mois Calendaires					
		1	2	3	4	5	6
Motorisation	Mo1	2430	2500	2500	2423	2454	2500
	Mo2	7449	8223	8910	7385	7706	7747
	Mo3	2121	2277	2590	2192	2240	2353
Niveau d'équipement	NE1	4215	4530	4869	4184	4321	4391
	NE2	6678	7270	7931	6616	6879	7009
	NE3	1107	1200	1200	1200	1200	1200

Tableau V- 6 : Réponse Industrielle à la Demande Commerciale (RIDC)

1.1.1.3. Commentaires sur la construction de la réponse industrielle à la demande commerciale

La résolution séquentielle de problèmes d'optimisation avec prise en compte des décisions antérieures, pose le problème de la définition d'un ordre d'optimisation. Les choix réalisés pour l'objet i contraignent les choix à faire pour l'objet $i+1$ lié à l'objet précédent par des relations documentaires ; une modification de l'ordre d'optimisation conduit à une solution différente du problème.

En l'absence de règles permettant de spécifier un « bon » ordre d'optimisation, il est nécessaire d'adopter une convention qui ne doit pas être modifiée entre deux cycles de planification pour garantir une certaine cohérence dans les réponses à la demande commerciale.

1.1.2. Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale

La *découpe* consiste à répartir la réponse industrielle à la demande commerciale, exprimée en mois calendaires, sur les semaines industrielles que comporte l'horizon de planification. La découpe doit, en priorité, respecter les ordres de fabrication positionnés sur l'horizon de planification et le volume du plan de montage. Les calendriers des usines d'assemblage permettent de lisser les quantités trouvées lors de la construction de la réponse industrielle à la demande commerciale.

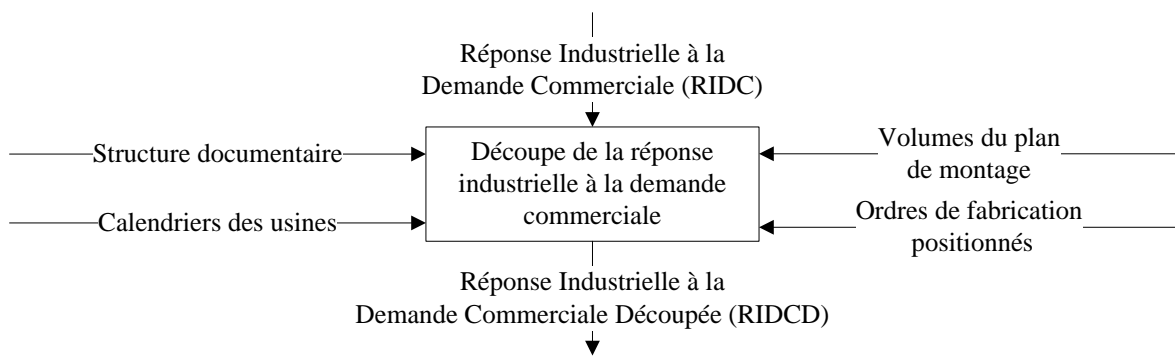


Figure V- 2: Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale

Une semaine industrielle pouvant être à cheval sur deux mois calendaires, les calendriers doivent être traduits en contribution relative d'une semaine de production au volume de production mensuel. Ce dernier point pose aussi la question de la cohérence documentaire qui doit être préservée en passant de la maille mensuelle à la maille

hebdomadaire. En toute rigueur, cela revient à envisager la possibilité que, pour une semaine donnée, deux nomenclatures coexistent sur des intervalles de temps disjoints¹.

1.1.2.1. Modélisation

Cette étape consiste en une optimisation en nombres entiers avec, comme contrainte, le respect des sommes sur les critères d'ordres de fabrication et sur le volume du plan de montage.

Pour cette partie, en plus de celles utilisées dans le §3.1.1, nous adopterons les notations suivantes² :

S : Nombre de périodes de l'horizon de la demande commerciale (semaines industrielles couvrant les mois calendaires T)

s : Période de l'horizon de la demande commerciale (semaine industrielle), avec $s=1\dots S$

Cal_{ts} : Pourcentage de la réponse industrielle à la demande commerciale en mois t à réaliser en semaine s . Une semaine donnée peut être à cheval sur, au plus, deux mois consécutifs. Cette information est issue des calendriers.

V_s : Volume du plan de montage en semaine s avec $V_s = \sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times V_t$

$Capa_{j_i,s}$: Capacité industrielle disponible pour j_i en semaine s

$OF_{j_i,s}$: Nombre d'ordres de fabrication de critère j_i placé en semaine s

$Doc_{i'i',s}$: Matrice de compatibilité documentaire en période s entre i et i' avec $i' < i$

$$\begin{cases} Doc_{i'i',s}[j_i, j_{i'}] = 1 \text{ si } j_i \text{ et } j_{i'} \text{ sont compatibles en semaine } s \\ Doc_{i'i',s}[j_i, j_{i'}] = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$RIDCD_{j_i,s}$: Réponse industrielle à la demande commerciale découpée pour j_i en semaine s , c'est la variable décisionnelle du problème

¹ Le fait de considérer une documentation identique sur tout l'horizon de planification nous évite d'avoir à traiter ce cas sans réelle valeur ajoutée pour notre étude.

² En passant du mois calendaire à semaine industrielle, seul le repérage temporel est modifié par rapport aux notations utilisées dans le §3.1.1.

$e_{j_i,s}$: Variable d'écart absolu avec

$$e_{j_i,s} = \max(RIDCD_{j_i,s} - \sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times RIDC_{j_i,t}, \sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times RIDC_{j_i,t} - RIDCD_{j_i,s})$$

$e_{i,s}^{Max}$: Variable d'écart maximum sur l'objet i en semaine s avec $e_{i,s}^{Max} = \max_{j_i} (e_{j_i,s})$

Comme pour le calcul de la réponse industrielle à la demande commerciale, nous modélisons l'étape de découpe sous la forme d'une séquence de résolution de problèmes linéaires en nombre entiers. La résolution se fait par objet et par semaine. Le résultat obtenu pour un objet i devient une contrainte à l'itération suivante pour l'objet i' . Compte tenu de la structure documentaire, une modification de la séquence d'optimisation peut générer des résultats sensiblement différents au niveau de la réponse industrielle à la demande commerciale.

1. $i=1$
2. $s=1$
3. Résoudre le PLNE de découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale :

- $Min \left[e_{i,s}^{Max} + \sum_{j_i=1}^{m_i} e_{j_i,s} \right]$: fonction objectif visant à minimiser la somme des écarts

entre $RIDCD_{j_i,s}$ et $\sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times RIDC_{j_i,t}$, et à la lier sur les critères d'un même

objet par l'introduction de $e_{i,s}^{Max}$

- $e_{j_i,s} \geq RIDCD_{j_i,s} - \sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times RIDC_{j_i,t} \quad \forall j_i = 1..m_i$

- $e_{j_i,s} \geq \sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times RIDC_{j_i,t} - RIDCD_{j_i,s} \quad \forall j_i = 1..m_i$

- $e_{i,t}^{Max} \geq e_{j_i,s} \quad \forall j_i = 1..m_i$

- $\sum_{j_i=1}^{m_i} RIDCD_{j_i,s} = V_s$: Contrainte de respect du volume du plan de montage.

S'exprime également à travers : $\sum_{j_i=1}^{m_i} RIDCD_{j_i,s} = \sum_{t=1}^T Cal_{ts} \times V_t$

- $RIDCD_{j_i,s} \leq Capa_{j_i,s} \quad \forall j_i = 1..m_i$: Contrainte de respect de la capacité industrielle

- $RIDCD_{j_i,s} \geq OF_{j_i,s} \forall j_i = 1 \dots m_i$: Contrainte de respect du nombre d'ordres de fabrication positionnés en t
 - Si $i > 1$ alors $RIDCD_{j_i,s} \leq \sum_{j_i'=1}^{m_i'} RIDCD_{j_i',s} \times Doc_{ii',s}[j_i, j_i'] \forall i' < i$ et $\forall j_i' = 1 \dots m_{i'}$:
Contrainte de respect de la cohérence documentaire avec les décisions antérieures
 - $RIDCD_{j_i,s} \in \mathbb{N} \forall j_i = 1 \dots m_i$: contrainte d'intégrité
4. $s = s + 1$
 5. Si $s \leq S$ aller à (3) sinon aller à (6)
 6. $i = i + 1$
 7. Si $i \leq n$ aller à (2) sinon STOP

Un certain nombre de conditions concernant la conservation des contraintes entre la maille mensuelle et la maille hebdomadaire sont nécessaires à la faisabilité de la découpe. Le nombre d'ordres de fabrication sur l'horizon doit être conservé¹ avec :

$$\sum_{s=1}^S OF_{j_i,s} | Cal_{ts} > 0 \text{ et } Cal_{t',s} = 0 \forall t' \neq t \leq OF_{j_i,t} \leq \sum_{s=1}^S OF_{j_i,s} | Cal_{ts} > 0 \quad \forall t = 1 \dots T \quad \forall j_i = 1 \dots m_i \quad \text{et}$$

$$\sum_{t=1}^T OF_{j_i,t} = \sum_{s=1}^S OF_{j_i,s} \quad \forall j_i = 1 \dots m_i .$$

De même, les capacités doivent satisfaire les relations² suivantes :

$$\sum_{s=1}^S Capa_{j_i,s} | Cal_{ts} > 0 \text{ et } Cal_{t',s} = 0 \forall t' \neq t \leq Capa_{j_i,t} \leq \sum_{s=1}^S Capa_{j_i,s} | Cal_{ts} > 0 \quad \forall t = 1 \dots T \quad \forall j_i = 1 \dots m_i \quad \text{et}$$

$$\sum_{t=1}^T Capa_{j_i,t} = \sum_{s=1}^S Capa_{j_i,s} \quad \forall j_i = 1 \dots m_i .$$

La conservation du volume du plan de montage est assurée par la relation :

$$\sum_{s=1}^S Cal_{ts} = 1 \quad \forall t = 1 \dots T$$

¹ Signifie que le nombre d'ordres de fabrication sur un mois quelconque t doit obligatoirement être supérieur ou égal au nombre d'ordres de fabrication positionnés sur les semaines industrielles complètement incluses dans le mois t ($Cal_{ts} > 0$ et $Cal_{t',s} > 0 \quad Cal_{t',s} = 0 \quad \forall t' \neq t$) et inférieur ou égale au nombre d'ordres de fabrication positionnés sur les semaines industrielles complètement ou partiellement incluses dans le mois t (en incluant celles qui sont à cheval sur t et $t-1$ et sur t et $t+1$: $Cal_{ts} > 0$).

² Idem que ¹ en remplaçant « ordres de fabrications » par « Capacités ».

Le nombre d'ordres de fabrication positionnés sur une semaine doit être inférieur à la capacité disponible sur cette même semaine $OF_{j_i,s} \leq Capa_{j_i,s} \quad \forall j_i = 1...m_i \text{ et } \forall s = 1...S$.

1.1.2.2. Illustration numérique

1.1.2.2.1. Données d'entrée

La réponse industrielle à la demande commerciale est la donnée principale de cette partie du processus ; elle figure dans le Tableau V- 6. Le volume du plan de montage (Cf. Tableau V- 2) est également utilisé comme donnée d'entrée à la découpe de la RIDC.

Les capacités et les ordres de fabrication sont la traduction, à une maille hebdomadaire, des informations utilisées lors de la construction de la RIDC (Cf. Tableau V- 7).

		Capacités						Ordres de fabrication					
		Motorisation			Niveau d'équipement			Motorisation			Niveau d'équipement		
		Mo1	Mo2	Mo3	NE1	NE2	NE3	Mo1	Mo2	Mo3	NE1	NE2	NE3
Semaines Industrielles	1	458	2273	2273	2273	2273	221	308	941	270	527	838	154
	2	596	2858	2858	2858	2858	286	468	1410	414	795	1256	241
	3	596	2858	2858	2858	2858	286	409	1235	363	696	1099	212
	4	596	2858	2858	2858	2858	286	456	1375	404	775	1225	235
	5	596	3000	3000	3000	3000	286	252	779	227	440	693	125
	6	596	3096	3096	3096	3096	286	94	312	90	177	277	42
	7	596	3096	3096	3096	3096	286	105	348	100	197	309	47
	8	596	3096	3096	3096	3096	286	105	347	100	197	308	47
	9	585	3130	3130	3130	3130	281	55	177	50	101	157	24
	10	569	3182	3182	3182	3182	273	15	37	9	23	34	4
	11	569	3182	3182	3182	3182	273	14	36	9	22	33	4
	12	569	3182	3182	3182	3182	273	15	38	9	24	35	3
	13	569	3182	3182	3182	3182	273	14	36	9	22	33	4
	14	596	2858	2858	2858	2858	286	0	0	0	0	0	0
	15	596	2858	2858	2858	2858	286	0	0	0	0	0	0
	16	596	2858	2858	2858	2858	286	0	0	0	0	0	0
	17	596	2858	2858	2858	2858	286	0	0	0	0	0	0
	18	460	2263	2263	2263	2263	221	0	0	0	0	0	0
	19	569	2819	2819	2819	2819	273	0	0	0	0	0	0
	20	569	2819	2819	2819	2819	273	0	0	0	0	0	0
	21	569	2819	2819	2819	2819	273	0	0	0	0	0	0
	22	574	2855	2855	2855	2855	276	0	0	0	0	0	0
	23	596	3000	3000	3000	3000	286	0	0	0	0	0	0
	24	596	3000	3000	3000	3000	286	0	0	0	0	0	0
	25	596	3000	3000	3000	3000	286	0	0	0	0	0	0
	26	596	3000	3000	3000	3000	286	0	0	0	0	0	0

Tableau V- 7 : Capacités (Capa) et Ordres de fabrication (OF)

Le calendrier et la documentation sont respectivement représentés dans le Tableau V- 8 et le Tableau V- 9.

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

		Mois Calendaires					
		1	2	3	4	5	6
Semaines Industrielles	1	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.10	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
	8	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.00	0.14	0.09	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00
	11	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00
	12	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00
	13	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00
	14	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00
	15	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00
	16	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00
	17	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00
	18	0.00	0.00	0.00	0.05	0.14	0.00
	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00
	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00
	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00
	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.05
	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
	26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24

Tableau V- 8 : Calendrier (Cal)

		NE1			NE2			NE2		
		Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3
Semaines Industrielles	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	2	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	3	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	4	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	5	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	6	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	7	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	8	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	9	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	10	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	11	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	12	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	13	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	14	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	15	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	16	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	17	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	18	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	19	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	20	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	21	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	22	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	23	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	24	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	25	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	26	1	1	0	1	1	1	0	1	1

Tableau V- 9 : Documentation (Doc)

1.1.2.2. Paramètres d'optimisation

Le choix de paramétrage à ce niveau du processus concerne l'ordre de passage des objets par l'optimisation. Nous gardons le même ordre de passage que celui utilisé pour le calcul de la réponse industrielle à la demande commerciale, à savoir : Motorisation, Niveau d'équipement.

1.1.2.3. Résultats de l'optimisation

Après application de l'algorithme de découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale, nous obtenons la RIDCD de chaque critère d'objet majeur sur un horizon de 26 semaines (Cf. Tableau V- 10).

		Motorisation			Niveau d'équipement		
		Mo1	Mo2	Mo3	NE1	NE2	NE3
Semaines Industrielles	1	458	1416	405	801	1269	210
	2	583	1788	509	1012	1603	266
	3	583	1788	509	1012	1603	266
	4	583	1788	509	1012	1603	266
	5	593	1896	531	1056	1686	279
	6	596	1974	549	1088	1745	286
	7	596	1974	549	1088	1745	286
	8	596	1974	549	1088	1745	286
	9	575	1953	552	1072	1732	276
	10	569	2050	600	1120	1826	273
	11	569	2050	600	1120	1826	273
	12	569	2050	600	1120	1826	273
	13	569	2050	600	1120	1826	273
	14	582	1772	526	1005	1588	286
	15	582	1772	526	1005	1588	286
	16	582	1772	526	1005	1588	286
	17	582	1772	526	1005	1588	286
	18	460	1449	426	815	1299	221
	19	564	1772	515	994	1584	273
	20	564	1772	515	994	1584	273
	21	564	1772	515	994	1584	273
	22	567	1774	521	997	1589	276
	23	596	1860	567	1054	1683	286
	24	596	1860	567	1054	1683	286
	25	596	1860	567	1054	1683	286
	26	596	1860	567	1054	1683	286

Tableau V- 10: Réponse Industrielle à la Demande Commerciale Découpée(RIDCD)

1.1.2.3. Commentaires sur la découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale

La découpe se présente comme une résolution séquentielle de problèmes de programmation linéaire en nombre entiers. Comme pour la construction de la demande commerciale, l'ordre de passage des objets par l'optimisation conditionne la réponse de l'algorithme. Dans les faits, la découpe est complètement intégrée à la construction de la

réponse industrielle à la demande commerciale ; l'ordre d'optimisation est le même pour les deux sous-processus.

La documentation véhicule, réputée stable dans notre modèle, ne l'est pas forcément dans la réalité. Le cadre documentaire exploité à la maille mensuelle n'est pas toujours compatible avec celui utilisé à la maille hebdomadaire. Les contraintes documentaires ne sont pas forcément identiques sur l'ensemble des semaines du mois, ce qui pose un problème de cohérence entre la réponse industrielle à la demande commerciale et sa découpe.

1.1.3. Construction des prévisions en versions

La construction des prévisions en versions s'alimente de la découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale pour établir des prévisions, non plus sur des items pris séparément, mais sur des combinaisons de critères d'objets majeurs. À une **version** correspond une combinaison unique de critères d'objets majeurs. Il s'agit d'une étape préliminaire à la génération de véhicules complètement définis. Le croisement des critères majeurs, pour en faire des versions, ne se justifie que pour la gestion des composants de jonction évoqués dans le §3 du chapitre III.

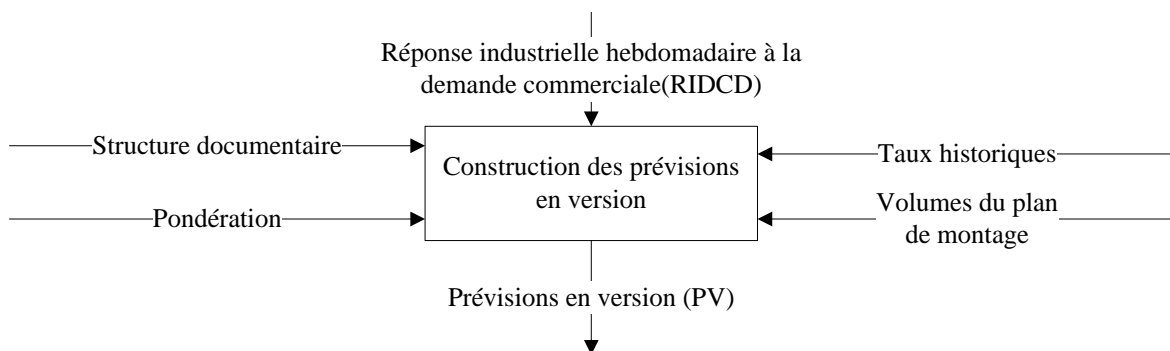


Figure V- 3: Construction des prévisions en version

Les prévisions en versions se doivent de respecter strictement la documentation véhicule et les volumes du plan de montage à la maille hebdomadaire. Cette étape consiste à répartir le volume du plan de montage sur les versions en se rapprochant le plus possible, au niveau des volumes par critère, de la réponse industrielle découpée $RIDCD_{j_i,s}$. Le nombre important de versions fait que les solutions faisables, en se restreignant à ce premier objectif, sont innombrables. Pour restreindre le sous-ensemble des solutions optimales, un deuxième

objectif visant à se rapprocher d'un taux prévisionnel par version¹ est introduit. Afin de faire converger le résultat de cette étape vers l'un ou l'autre des deux objectifs, une logique de pondération est introduite pour pénaliser plus fortement un écart par rapport au résultat de la découpe ou par rapport au taux prévisionnel par version. Il en résulte que la fonction-objectif utilisée pour la résolution correspond à une somme pondérée de deux fonctions-objectifs.

1.1.3.1. Modélisation

Pour cette partie, en plus de celles utilisées dans le §3.1.1 et le §3.2.1, nous adoptons les notations suivantes :

$V_{j_1 j_2 \dots j_n}$: Version issue du tableau booléen décrivant les versions possibles résultant de la combinaison des critères j_1, j_2, \dots, j_n des objets majeurs i avec $i=1 \dots n$

$PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s}$: Prévision en version $V_{j_1 j_2 \dots j_n}$ pour la semaine s , c'est la variable de décision du problème.

Doc_s : Matrice de compatibilité documentaire en période entre les critères des objets majeurs² avec :

$$\begin{cases} Doc_s[j_1, j_2, \dots, j_n] = 1 \text{ si les critères } j_i \forall i = 1 \dots n \text{ sont compatibles en période } s \\ Doc_s[j_1, j_2, \dots, j_n] = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s}$: Taux de version prévisionnel de $V_{j_1 j_2 \dots j_n}$ pour la semaine s avec $0 \leq TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \leq Doc_s[j_1, j_2, \dots, j_n]$

$TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s'}^*$: Taux de version historique de $V_{j_1 j_2 \dots j_n}$ enregistré en semaine s' avec $s' \leq 0$.

P : Poids accordé au taux prévisionnel par version³.

$e_{j_1 j_2 \dots j_n, s}$: Écart absolu par rapport au taux de version en s

¹ Les taux prévisionnels par version correspondent à la moyenne des taux historiques de demande calculée sur les six dernières semaines. Il est arbitrairement fixé à 1% lorsque les historiques sont inexistantes.

² Contrairement à la construction de la réponse industrielle à la demande commerciale, l'optimisation se fait sans itération sur les objets i . Elle se fait sur des combinaisons de critères d'objets majeurs, d'où l'utilisation d'une matrice à n dimensions.

³ Par défaut, le poids accordé au résultat de la découpe est égal à 1.

$e_{j_i,s}$: Écart absolu par rapport à la découpe sur le critère j_i

La prévision en version se calcule à l'aide d'un algorithme d'optimisation quadratique avec contraintes linéaires. L'optimisation quadratique a pour intérêt de lisser les écarts en favorisant l'apparition de plusieurs « petits écarts » plutôt que quelques « gros écarts ».

Le programme doit être exécuté sur chaque semaine de l'horizon de planification.

1. $s=1$

2. Résoudre le programme quadratique de calcul des prévisions en version

• $Min \left[P \times \sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} (e_{j_1 j_2 \dots j_n, s})^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j_i=1}^{m_i} (e_{j_i, s})^2 \right]$: fonction objectif quadratique

• $e_{j_1, s} = \left[\sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_i=1}^{m_i} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} PV_{j_1 j_2 \dots j_i \dots j_n, s} - RIDCD_{j_1, s} \right] \forall j_1 = 1 \dots m_1$

• $e_{j_i, s} = \left[\sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_{i-1}=1}^{m_{i-1}} \sum_{j_{i+1}=1}^{m_{i+1}} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} PV_{j_1 j_2 \dots j_i \dots j_n, s} - RIDCD_{j_i, s} \right] \forall j_i = 1 \dots m_i \forall i$ tel que $1 < i < n$

• $e_{j_n, s} = \left[\sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_i=1}^{m_i} \dots \sum_{j_{n-1}=1}^{m_{n-1}} PV_{j_1 j_2 \dots j_i \dots j_n, s} - RIDCD_{j_n, s} \right] \forall j_n = 1 \dots m_n$

• $OF_{j_1, s} \leq \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_i=1}^{m_i} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} PV_{j_1 j_2 \dots j_i \dots j_n, s} \leq Capa_{j_1, s} \forall j_1 = 1 \dots m_1$: Contraintes de respect des capacités et du nombre d'ordre de fabrication positionnés en s

• $OF_{j_i, s} \leq \sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_{i-1}=1}^{m_{i-1}} \sum_{j_{i+1}=1}^{m_{i+1}} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} PV_{j_1 j_2 \dots j_i \dots j_n, s} \leq Capa_{j_i, s} \forall j_i = 1 \dots m_i \forall i$ tel que $1 < i < n$: Contraintes de respect des capacités et du nombre d'ordre de fabrication positionnés en s

• $OF_{j_n, s} \leq \sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_i=1}^{m_i} \dots \sum_{j_{n-1}=1}^{m_{n-1}} PV_{j_1 j_2 \dots j_i \dots j_n, s} \leq Capa_{j_n, s} \forall j_n = 1 \dots m_n$: Contraintes de respect des capacités et du nombre d'ordre de fabrication positionnés en s

• $\sum_{j_1=1}^{m_1} \sum_{j_2=1}^{m_2} \dots \sum_{j_n=1}^{m_n} PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} = V_s$: contrainte de respect du plan de montage

- $PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \leq Doc_s[j_1, j_2, \dots, j_n] \times M \quad \forall j_1, j_2, \dots, j_n$ et M une constante de valeur élevée : contrainte documentaire
 - $e_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \geq PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} - TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \times V_s \quad \forall j_1, j_2, \dots, j_n$
 - $e_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \geq TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \times V_s - PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \quad \forall j_1, j_2, \dots, j_n$
 - $PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} \in \mathbb{N} \quad \forall j_1, j_2, \dots, j_n$: contrainte d'intégrité
3. $s = s + 1$
 4. Si $s \leq S$ aller à 2 sinon STOP

1.1.3.2. Illustration numérique

1.1.3.2.1. Données d'entrée

Le résultat de l'optimisation du sous-processus de découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale (Cf. Tableau V- 10) est la donnée d'entrée principale du sous-processus de construction des prévisions en version.

Les taux de version prévisionnels sont présentés dans le tableau ci-dessous.

		Versions								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		NE1			NE2			NE2		
		Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3
Semaines Industrielles	1	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	2	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	3	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	4	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	5	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	6	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	7	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	8	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	9	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	10	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	11	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	12	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	13	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	14	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	15	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	16	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	17	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	18	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	19	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	20	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	21	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	22	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	23	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	24	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	25	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08
	26	0.15	0.2	0	0.05	0.4	0.1	0	0.02	0.08

Tableau V- 11 : Taux de Version (TV)

1.1.3.2.2. Paramètres d'optimisation

Le paramétrage consiste à attribuer un poids, à intégrer dans la fonction objectif, aux taux de version. Dans cet exemple nous supposons un poids égal à 1.

1.1.3.2.3. Résultats d'optimisation

		Versions								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		NE1			NE2			NE2		
		Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3
Semaines Industrielles	1	343	459	0	115	916	232	0	41	173
	2	435	578	0	148	1156	292	0	53	217
	3	435	578	0	148	1156	292	0	53	217
	4	435	578	0	148	1156	292	0	53	217
	5	444	612	0	152	1216	309	0	62	224
	6	446	642	0	150	1266	329	0	64	222
	7	446	642	0	150	1266	329	0	64	222
	8	446	642	0	150	1266	329	0	64	222
	9	437	635	0	148	1251	327	0	61	220
	10	435	685	0	134	1329	363	0	36	237
	11	435	685	0	134	1329	363	0	36	237
	12	435	685	0	134	1329	363	0	36	237
	13	435	685	0	134	1329	363	0	36	237
	14	434	571	0	147	1150	291	0	53	233
	15	434	571	0	147	1151	290	0	53	233
	16	434	571	0	147	1151	290	0	53	233
	17	434	571	0	147	1151	290	0	53	233
	18	343	473	0	117	941	240	0	35	186
	19	422	574	0	145	1146	291	0	52	221
	20	422	574	0	145	1146	291	0	52	221
	21	422	574	0	145	1146	291	0	49	224
	22	424	575	0	145	1150	291	0	48	228
	23	444	611	0	152	1216	314	0	39	247
	24	444	611	0	152	1216	314	0	39	247
	25	444	611	0	152	1216	314	0	39	247
	26	444	611	0	152	1216	314	0	39	247

Tableau V- 12 : Prévisions en Version (PV)

1.1.3.3. Commentaires sur la construction des prévisions en versions

L'introduction des poids dans la fonction-objectif consiste à orienter la recherche de la solution optimale en tenant compte, en plus de l'écart par rapport à la réponse industrielle découpée, d'un écart par rapport à un taux prévisionnel correspondant à la moyenne des taux de demande historique sur les six dernières semaines

$$TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s} = \frac{1}{6} \times \sum_{s'=-5}^0 TV_{j_1 j_2 \dots j_n, s'}^* \quad \forall s=1 \dots S \text{ et } \forall j_1, j_2, \dots, j_n.$$

Le paramétrage des poids dans la fonction-objectif revient à encourager l'obtention d'une résolution qui tend plutôt vers la réponse industrielle ou plutôt vers les taux de demande historique. Il est très difficile de fixer objectivement la valeur de ces poids qui pourtant conditionnent fortement le type de solution

trouvée. Il est d'autant plus difficile de paramétrer ces poids qu'ils s'appliquent à l'identique sur toutes les versions et tous les critères d'objets majeurs.

D'autre part, le taux prévisionnel, calculé à partir de l'historique, s'applique généralement¹ de façon identique sur tout l'horizon de planification. Une telle projection n'a de sens que sur le court terme ou pour des versions dont le comportement de la demande est extrêmement stable et prévisible. L'existence de taux historiques n'est pas évidente, notamment pour les nouvelles versions ; le taux prévisionnel est fixé par défaut à 1 % pour ce type de versions sans que les conséquences de cette règle ne soient connues.

L'inexistence de contrainte de respect strict de la réponse industrielle à la demande commerciale découpée à la semaine fait que la consolidation par critère des prévisions en versions peut sensiblement être différente de la réponse industrielle à la demande commerciale. La construction des prévisions en version aura tendance à déformer la réponse industrielle à la demande commerciale. L'ampleur de la déformation dépend, notamment, de la valeur des poids dans la fonction-objectif.

1.1.4. Construction des prévisions en véhicules complètement définis

La construction d'un VCD se fait par l'enrichissement des versions à l'aide des critères des objets optionnels non programmés par le commerce. Cette opération ne se justifie que pour les composants de jonction (définis dans le §3 du chapitre III) utilisés par certaines combinaisons de critères d'objets optionnels et/ou d'objets majeurs.

La transformation des prévisions en version $PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s}$ en prévisions en VCD, par l'introduction des critères des objets mineurs ou optionnels, s'appuie sur la même logique que celle de la construction des prévisions en versions. La séparation de ces deux phases s'explique, en partie, par l'organisation de la nomenclature qui définit la compatibilité des critères d'objets optionnels, non pas avec les critères des objets majeurs, mais directement avec les versions. Une autre explication, moins technique, vient du fait qu'historiquement le commerce exprimait sa demande au niveau des versions (Paché, 1994). L'explosion de la diversité a rendu cette activité impossible à réaliser et a contraint le commerce à s'exprimer au niveau des critères d'objets majeurs. Pour garder la logique de construction de véhicules complètement définis, la construction des prévisions en versions a été introduite dans le processus de déclinaison de la demande commerciale.

¹ On trouve une adaptation manuelle de ce taux dans certains cas.

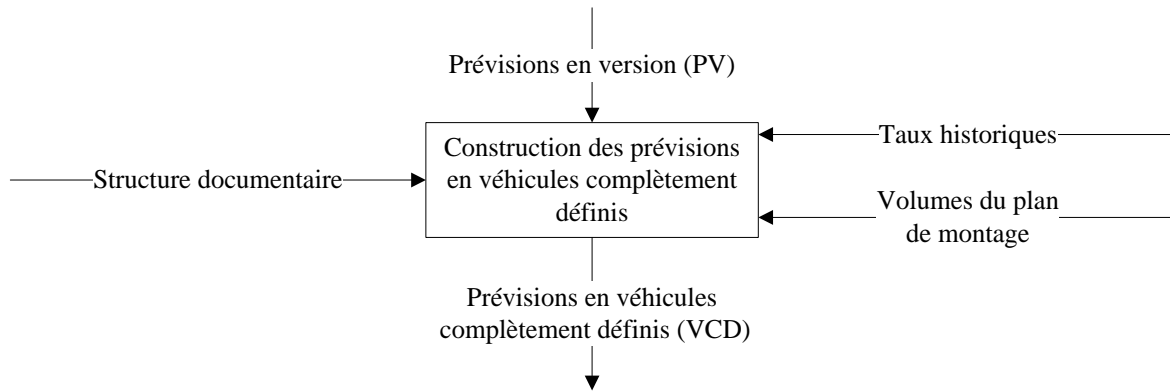


Figure V- 4 : Construction des prévisions en véhicules complètement définis

Nous examinerons le cas simple où la structure documentaire permet d'identifier la nature de la relation qui existe entre les critères d'un objet optionnel et les versions. Dans la réalité, les relations documentaires sont établies entre des combinaisons de critères optionnels dépendant¹ entre eux et les versions.

La construction des VCD passe par les deux étapes que sont : le calcul des probabilités conditionnelles des critères d'option connaissant la version du véhicule, et le tirage aléatoire d'un nombre de VCD cohérent avec le volume du plan de montage.

Pour le calcul des probabilités conditionnelles, nous disposons des probabilités conditionnelles - cibles de choix des critères d'option connaissant la version d'un véhicule²- ainsi que les volumes de version convertis en taux (qui correspondent à des probabilités marginales). Étant donné une version, l'objectif est de calculer la probabilité qu'un critère d'option soit choisi en se rapprochant le plus possible des taux historiques tout en respectant un certain nombre de contraintes qui seront explicitées dans la modélisation ci-après.

1.1.4.1. Modélisation

Pour désigner les versions, nous adopterons une notation simplifiée par rapport à celle utilisée jusqu'à présent en repérant par u la $u^{\text{ème}}$ version avec $u=1..U$ (rappelons qu'une version est une combinaison de critères d'objets majeurs ; on suppose donc qu'il y a U

¹ La notion de dépendance fait référence au fait qu'il existe entre certains critères des liens d'implication (Ex. : le toit ouvrant implique les rétroviseurs électriques) ou d'exclusion (Ex. : la direction assistée exclue les vitres manuelles). En considérant que le lien est direct entre les critères d'une option et les versions, nous supposons qu'il n'existe pas de dépendance documentaire entre les critères d'objets optionnels.

² Ces taux sont fournis par le marketing ou issus des taux historiques moyennés sur les six dernières semaines. Lorsqu'un taux n'est pas disponible, il est fixé par défaut à 1%.

combinaisons possibles). Cette partie du processus s'appuie sur la résolution d'un programme linéaire faisant intervenir les notations suivantes :

$P_{u,s}$: Volume prévisionnel de la $u^{\text{ème}}$ version en semaine s (issu de la construction des prévisions en version. Remplace la notation $PV_{j_1 j_2 \dots j_n, s}$ avec $u \equiv V_{j_1 j_2 \dots j_n}$)

$P_s(u)$: Probabilité associée à la version u en semaine s (taux de versions $P_s(u) = \frac{P_{u,s}}{V_s}$)

avec V_s le volume du plan de montage en semaine s)

o : Objet optionnel o avec $o=1 \dots O$

j_o : Critère j de l'objet optionnel o avec $j=1 \dots m_o$

$P_s^*(j_o/u)$: Variable de décision représentant la probabilité de j_o connaissant u en s .

$P_s(j_o/u)$: Probabilité de j_o sachant u en s , issue des historiques ou fournie par le marketing (elle représente la valeur cible de laquelle $P_s^*(j_o/u)$ doit se rapprocher).

$Doc_{uo,s}$: Matrice de compatibilité documentaire en période s entre u et o avec :

$$\begin{cases} Doc_{uo,s}[u, j_o] = 2 & \text{si } j_o \text{ est systématiquement associé à } u \text{ en semaine } s \\ Doc_{uo,s}[u, j_o] = 1 & \text{si l'association entre } j_o \text{ et } u \text{ est autorisée en semaine } s \\ Doc_{uo,s}[u, j_o] = 0 & \text{si l'association entre } j_o \text{ et } u \text{ est interdite en semaine } s \end{cases}$$

$e_{j_o/u,s}$: Variable d'écart absolu du critère j_o en semaine s connaissant la version u

avec $e_{j_o/u,s} = \max(P_s^*(j_o/u) - P_s(j_o/u), P_s(j_o/u) - P_s^*(j_o/u))$

$e_{j_o,s}$: Variable d'écart du critère j_o en semaine s avec $e_{j_o,s} = \sum_{u=1}^U e_{j_o/u,s}$

$e_{o,s}^{\max}$: Variable d'écart maximale de l'option o en semaine s avec

$e_{o,s}^{\max} = \max_{j_o} (e_{j_o,s})$ où $j_o = 1 \dots m_o$

La génération des véhicules complètement définis se fait en deux étapes. La première consiste à calculer les probabilités conditionnelles des critères d'objets optionnels connaissant

la version du VCD. Dans la seconde étape, un tirage aléatoire d'un nombre de VCD compatible avec le plan de montage est réalisé selon la méthode de Monte-Carlo.

1.1.4.1.1. Étape 1 : calcul des probabilités conditionnelles

L'algorithme de calcul des probabilités conditionnelles se présente comme la résolution, par période et par objet optionnel, d'un programme linéaire.

1. $s=1$
2. $o=1$
3. Résoudre le programme linéaire :
 - $Min \left[e_{o,s}^{\max} + \sum_{j_o=1}^{m_o} e_{j_o,s} \right]$: fonction objectif
 - $e_{j_o,s} = \sum_{u=1}^U e_{j_o/u,s} \quad \forall j_o = 1 \dots m_o$: écart par critère d'option
 - $e_{j_o/u,s} \geq P_s^*(j_o/u) - P_s(j_o/u) \quad \forall j_o = 1 \dots m_o \quad \forall u = 1 \dots U$: écart par critère d'option connaissant la version du VCD
 - $e_{j_o/u,s} \geq P_s(j_o/u) - P_s^*(j_o/u) \quad \forall j_o = 1 \dots m_o \quad \forall u = 1 \dots U$: écart par critère d'option connaissant la version du VCD
 - $e_{o,s}^{\max} \geq e_{j_o,s} \quad \forall j_o = 1 \dots m_o$ écart maximum par option
 - Si $Doc_{uo,s}[u, j_o] = 2$ alors $P_s^*(j_o/u) = 1$
 - Si $Doc_{uo,s}[u, j_o] = 0$ alors $P_s^*(j_o/u) = 0$
 - $\sum_{u=1}^U P_s^*(j_o/u) \times P_s(u) \geq \sum_{u=1/Doc_{uo,s}[u, j_o]=2}^U P_s(u) \quad \forall j_o = 1 \dots m_o$: borne inférieure de la probabilité d'un critère
 - $\sum_{u=1}^U P_s^*(j_o/u) \times P_s(u) \leq \sum_{u=1/Doc_{uo,s}[u, j_o] \neq 0}^U P_s(u) \quad \forall j_o = 1 \dots m_o$: borne supérieure de la probabilité d'un critère
 - $\sum_{j_o=1}^{m_o} P_s^*(j_o/u) = 1 \quad \forall u = 1 \dots U$ avec $Max_{j_o} (Doc_{uo,s}[u, j_o]) \neq 0$
 - $0 \leq P_s^*(j_o/u) \leq 1 \quad \forall u = 1 \dots U \quad \forall j_o = 1 \dots m_o$

4. $o = o + 1$
5. Si $o \leq O$ aller à 3 sinon aller à 6
6. $s = s + 1$
7. Si $s \leq S$ aller à 2 sinon STOP

1.1.4.1.2. Étape 2 : tirage aléatoire

Le tirage aléatoire s'appuie sur une hypothèse d'indépendance des critères d'options entre eux¹.

Le tirage aléatoire utilise un générateur de nombre aléatoire et les fonctions de répartitions des critères sachant les versions pour sélectionner aléatoirement un nombre d'individus correspondant au volume hebdomadaire du plan de montage². Chaque individu est un véhicule complètement défini sur l'ensemble des options et des objets majeurs. Les probabilités conditionnelles sont actualisées après chaque tirage pour tenir compte de la modification des propriétés de la population.

1. $s = 1$
2. $u = 1$
3. $v = 1$ (compteur du nombre de tirages)
4. $o = 1$
5. $j_o = 1$
6. Tirer un nombre aléatoire x avec $0 \leq x \leq 1$
7. Si $x \leq \sum_{j'_o=1}^{j_o} P_s(j'_o/u)$ alors choisir le critère j_o pour l'option o et aller à 8 sinon aller à 10
8. $P_s(j_o/u) = \frac{[(P_{u,s} - v) \times P_s(j_o/u)] - 1}{(P_{u,s} - v) - 1}$ avec $P_{u,s} > v + 1$
9. $P_s(j'_o/u) = \frac{[(P_{u,s} - v) \times P_s(j'_o/u)]}{(P_{u,s} - v) - 1} \quad \forall j'_o \neq j_o$ avec $P_{u,s} > v + 1$
10. $j_o = j_o + 1$ aller à 7

¹ Lorsqu'il y a dépendance entre critères, les options auxquelles ils sont rattachés sont regroupées pour former une méta-option dont les critères sont les combinaisons des critères des options qu'elle regroupe. L'indépendance est ainsi garantie entre les méta-options.

² Ce mode opératoire est celui de la méthode de Monte-Carlo.

11. Si $o \leq O$ alors $o = o + 1$ aller à 5 sinon aller à 12
12. Si $v \leq P_{u,s}$ alors $v = v + 1$ aller à 4 sinon aller à 13
13. Si $u \leq U$ alors $u = u + 1$ aller à 3 sinon aller à 14
14. Si $s \leq S$ alors $s = s + 1$ aller à 2 sinon STOP

1.1.4.2. Illustration numérique

1.1.4.2.1. Données d'entrée

À partir de cette étape, nous considérons l'existence de deux objets optionnels que sont la **radio (Rad)** et la **climatisation (Clim)**. Chaque véhicule pouvant être équipé ou pas d'une option, chacun des objets se décline en deux critères : avec ou sans l'option considérée.

La donnée d'entrée principale est le résultat de la construction des prévisions en version. Le calcul des probabilités conditionnelles, première étape du sous-processus de construction des prévisions en VCD, nécessite la connaissance des probabilités conditionnelles issues des historiques. Elles sont présentées en Tableau V- 13. La documentation est présentée en Tableau V- 14.

1.1.4.2.2. Paramètres d'optimisation

Il n'y a pas de paramétrage particulier à ce niveau du processus. L'ordre d'optimisation des objets optionnels n'a pas d'importance compte tenu de l'indépendance documentaire entre les critères (Cf. note 1 en Page 93).

1.1.4.2.3. Résultats d'optimisation

Le résultat du calcul des probabilités conditionnelles des critères d'objets optionnels connaissant les versions est présenté en Tableau V- 15. Le résultat du tirage aléatoire des véhicules complètement définis, réalisé selon la méthode de Monte-Carlo en tenant compte des probabilités conditionnelles actualisées après chaque tirage, est présenté en Tableau V- 16.

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Objet	Critère	Version	Semaine Industrielle																													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
Rad	Avec	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			
		2	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98		
		3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Sans	4	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66		
		5	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71		
		6	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	
	Clim	Avec	1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10		
			2	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	
			3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sans		4	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	
		5	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	
		6	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Sans		7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		8	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
		9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tableau V- 15 : Probabilités conditionnelles des critères d'objets optionnels connaissant les versions

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Version	Rad	Clim	Semaine Industrielle																											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
			Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans
1	Sans	Sans	52	77	61	72	81	68	78	77	55	51	59	60	61	68	65	58	54	42	65	52	54	54	58	66	60	63		
		Avec	307	379	401	343	430	452	430	451	425	395	386	386	384	366	369	376	380	301	357	370	368	370	386	378	384	381		
2	Sans	Sans	67	93	93	95	100	94	93	104	96	99	127	119	122	93	82	95	98	71	99	81	101	105	94	106	103	99		
		Avec	15	18	16	29	24	13	19	14	15	16	19	16	15	10	9	11	6	6	20	15	20	11	16	17	17	13		
3	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	Sans	Sans	7	5	9	4	4	4	7	2	6	8	8	6	5	3	14	7	5	9	3	5	10	16	7	11	10	13		
		Avec	19	24	28	34	15	17	13	14	25	24	19	32	23	27	26	27	27	26	25	33	30	27	28	27	35	30		
5	Sans	Sans	17	15	21	34	18	13	14	15	14	21	25	29	20	30	26	25	23	24	27	30	26	32	36	31	20	22		
		Avec	56	82	62	96	48	42	35	36	60	69	72	55	75	87	81	88	92	58	90	77	79	70	81	83	87	87		
6	Sans	Sans	249	311	361	317	387	365	338	324	319	364	318	366	314	277	311	288	289	228	297	283	294	345	304	319	312	304		
		Avec	276	361	339	349	401	473	486	495	440	454	476	455	488	429	387	428	401	334	431	387	393	370	417	425	421	431		
7	Sans	Sans	216	260	247	235	260	247	232	235	227	202	260	219	218	186	207	176	182	164	189	207	202	189	211	193	216	184		
		Avec	202	255	242	228	272	291	332	335	328	324	288	303	322	258	246	259	279	215	229	269	257	246	284	279	267	297		
8	Sans	Sans	112	146	134	151	127	132	136	145	153	167	182	155	169	135	143	145	139	124	136	138	145	137	148	143	167	167		
		Avec	21	28	37	32	34	42	45	40	38	37	42	58	44	37	40	30	41	29	38	40	43	30	41	34	30	38		
9	Sans	Sans	69	86	91	92	88	93	86	84	90	128	108	116	119	88	92	93	98	70	94	92	72	107	100	105	93	85		
		Avec	19	22	23	24	22	26	22	20	27	28	27	31	28	31	15	22	12	17	23	21	31	17	25	32	24	24		
9	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
		Avec	184	227	223	210	262	258	262	262	240	240	240	240	240	233	233	233	233	233	186	221	221	224	228	247	247	247		

Tableau V- 16 : Prévisions en véhicules complètement définis (VCD)

1.1.4.3. Commentaires sur la construction des prévisions en véhicules complètement définis

Les taux utilisés, lorsqu'ils proviennent d'un historique, sont appliqués indifféremment sur tout l'horizon de planification. Envisageable sur le court terme, cette façon de procéder peut générer des résultats à moyen et long terme irréalistes.

Les modifications, au niveau de l'offre commerciale, des combinaisons autorisées entre critères d'options et versions, font que très souvent les historiques sont inutilisables. En l'absence d'information du marketing, le taux des nouvelles combinaisons est fixé par défaut à 1 %.

Concernant le tirage aléatoire, plus la taille de l'échantillon (correspondant au volume hebdomadaire du plan de montage) est faible pour une version donnée, plus l'échantillon prélevé aura tendance à déformer les probabilités conditionnelles calculées.

1.1.5. Construction du plan directeur de fabrication de véhicules

La construction du plan directeur de fabrication de véhicules consiste à adapter le résultat du calcul de prévision en VCD pour qu'il soit compatible avec les contraintes de l'usine¹ et les ordres de fabrication positionnés. Les VCD qui ne sont pas des ordres de fabrication seront nommés *pseudo- véhicules* pour signifier leur caractère fictif.

En plus de l'application des contraintes d'ordonnancement², une opération consistant à remplacer certains pseudos-véhicules par des ordres de fabrication est réalisée. La *défalcation* des pseudos véhicules, ou la *décrémentation* des prévisions, se fait de telle sorte à ce que les véhicules fictifs supprimés soient les plus ressemblants possible aux ordres de fabrication qu'ils sont censés représenter. On part d'une prévision en véhicules complètement définis, constituée exclusivement de pseudos-véhicules, pour construire un plan directeur de fabrication de véhicules qui contient des ordres de fabrication et des pseudos-véhicules.

¹ Il s'agit essentiellement de contraintes liées à l'ordonnancement et à la capacité de production de certains composants.

² Nous ne nous intéresserons pas à cette partie du processus qui intervient à un niveau fin de découpage temporel réputée neutre pour les approvisionnements.

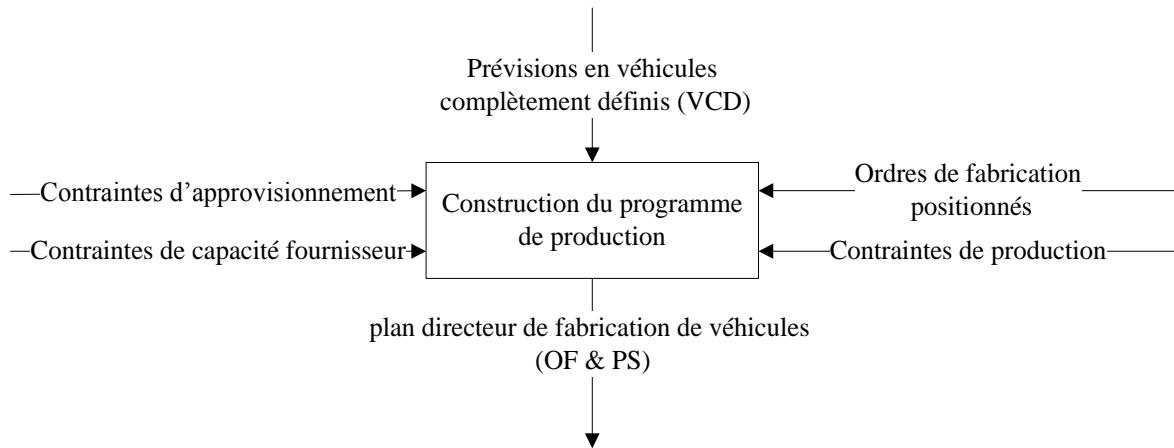


Figure V- 5 : Construction du plan directeur de fabrication de véhicules

L'algorithme de défalcation des pseudos-véhicules se présente comme un programme linéaire en nombre entiers appliqué à une maille mensuelle. L'objectif recherché est de minimiser une fonction d'écart définie sur des critères préalablement sélectionnés. La principale contrainte du programme linéaire est la défalcation d'un nombre de pseudos-véhicules identique au nombre d'ordres de fabrication.

1.1.5.1. Modélisation

Soient les notations suivantes :

τ : Période correspondant au mois industriel¹ $\tau=1...T$

s : Période correspondant à la semaine industrielle $s=1...S$

k : Objet retenu² comme élément de comparaison $k=1...K$

j_k : Critère j de l'objet k avec $j_k=1...m_k$

f : famille de véhicule qui rassemble les VCD (pseudo-véhicules et ordre de fabrication) ayant la même combinaison de critère sur les objets k .

Ω : Ensemble des familles de véhicules avec $\Omega=\{1...F\}$, avec $F=card(\Omega)=\prod_{k=1}^K m_k$.

Chaque famille de véhicules est un ensemble de pseudos et d'ordre de fabrication partageant la même combinaison de critères d'objets retenus pour la comparaison. Si pour $f \subset \Omega$ on a $f = \emptyset$ alors aucun pseudo-véhicule ni ordre de fabrication ne

¹ Pour éviter les confusions, la notation t est réservée au mois calendaire,

² Peut-être un objet majeur ou un objet optionnel

possède les caractéristiques de la famille f . Cette situation apparaît lorsque la combinaison de critères qui définit f est interdite par la documentation ou qu'aucun des véhicules, issus de la construction des prévisions en véhicules complètement définis, ne comporte la combinaison de critères en question. Un pseudo ou un ordre de fabrication appartient à une et une seule famille.

$VCD_{f,s}$: Nombre de pseudos-véhicules avant décrémentation appartenant à la famille f positionnés en semaine s avec :

$$\begin{cases} Cal_{\tau s} = 1 \text{ si la semaine } s \text{ fait partie du mois } \tau \\ Cal_{\tau s} = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$OF_{f,s}$: Nombre d'ordres de fabrication appartenant à la famille f positionnés en semaine s

$PS_{f,s}$: Nombre de pseudos-véhicules décrémentés appartenant à la famille f positionnés en semaine s : c'est la variable de décision du modèle

P_{j_k} : Poids associé au critère j de l'objet k

a_{f,j_k} : Coefficient qui établit le lien entre le critère j de l'objet k et la famille f avec :

$$\begin{cases} a_{f,j_k} = 1 \text{ si le critère } j \text{ de l'objet } k \text{ définit la famille } f \\ a_{f,j_k} = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Pen_{j_k} : Pénalité de sur-décrémentation du critère j de l'objet k

$e_{j_k,s}^{abs}$: Variable d'écart absolu de j_k en semaine s

$e_{j_k,s}$: Variable d'écart algébrique de j_k en semaine s

L'algorithme de défalcation se présente comme une résolution successive de programmes linéaires en nombre entier sur chacun des mois de l'horizon de planification :

1. $\tau = 1$

2. Résoudre le PLNE de décrémentation de pseudos véhicules :

- $Min \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j_k=1}^{m_k} \sum_{s=1}^S Cal_{\tau s} \times \left[P_{j_k} \times e_{j_k,s}^{abs} + Pen_{j_k} \times e_{j_k,s} \right] \right]$: fonction objectif

- $e_{j_k,s} = Cal_{\tau s} \times \left[\sum_{f=1}^F a_{f,j_k} \times PS_{f,s} - \sum_{f=1}^F a_{f,j_k} \times of_{f,s} \right] \forall s=1...S \forall k=1...K$

$$\forall j_k = 1...m_k$$

- $e_{j_k,s}^{abs} \geq e_{j_k,s} \forall s=1...S \forall k=1...K \forall j_k = 1...m_k$

- $e_{j_k,s}^{abs} \geq -e_{j_k,s} \forall s=1...S \forall k=1...K \forall j_k = 1...m_k$

- $\sum_{f=1}^F Cal_{\tau s} \times PS_{f,s} = \sum_{f=1}^F Cal_{\tau s} \times of_{f,s} \forall s=1...S$: pour respecter les plans de montage, le nombre de pseudos décrémentés par semaine doit être égal au nombre d'ordres de fabrication disponibles sur la même semaine

- $PS_{f,s} \leq VCD_{f,s} \forall f \in \Omega \forall s=1...S$

3. $\tau = \tau + 1$

4. Si $\tau \leq T$ aller à 2 sinon STOP

1.1.5.2. Illustration numérique

1.1.5.2.1. Données d'entrée

La principale donnée d'entrée de ce sous-processus est le résultat des prévisions en véhicules complètement définis. Comme il s'agit de confronter les prévisions aux ordres de fabrication, il est nécessaire de connaître les volumes d'OF et leurs caractéristiques (Cf. Tableau V- 17).

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Version	Rad	Clim	Semaine Industrielle																										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	Avec	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Avec	Avec	12	16	11	24	16	4	5	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	44	73	64	70	50	12	20	24	9	2	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Avec	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Avec	Avec	6	5	9	2	3	1	4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	16	23	25	23	11	3	4	7	4	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Avec	Avec	13	14	18	27	13	4	5	6	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	44	77	52	64	36	12	10	9	7	2	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Avec	Avec	166	238	250	254	157	61	65	72	37	10	4	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	167	267	209	265	126	60	55	60	33	5	9	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Avec	Avec	160	216	180	195	116	42	50	38	26	7	8	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	117	191	159	176	105	40	56	55	19	2	2	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Avec	Avec	76	114	93	109	56	28	29	30	12	3	1	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	14	23	27	21	13	6	5	10	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Avec	Avec	45	71	59	69	46	15	24	19	12	3	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	14	17	18	20	11	5	2	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau V- 17 : Ordres de fabrication complètement définis

Le calendrier industriel, qui précise l'appartenance d'une semaine industrielle à un mois industriel, est présenté ci-dessous.

		Mois Industriels					
		1	2	3	4	5	6
Semaines Industrielles	1	1	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0
	3	1	0	0	0	0	0
	4	1	0	0	0	0	0
	5	1	0	0	0	0	0
	6	0	1	0	0	0	0
	7	0	1	0	0	0	0
	8	0	1	0	0	0	0
	9	0	1	0	0	0	0
	10	0	0	1	0	0	0
	11	0	0	1	0	0	0
	12	0	0	1	0	0	0
	13	0	0	1	0	0	0
	14	0	0	0	1	0	0
	15	0	0	0	1	0	0
	16	0	0	0	1	0	0
	17	0	0	0	1	0	0
	18	0	0	0	1	0	0
	19	0	0	0	0	1	0
	20	0	0	0	0	1	0
	21	0	0	0	0	1	0
	22	0	0	0	0	1	0
	23	0	0	0	0	0	1
	24	0	0	0	0	0	1
	25	0	0	0	0	0	1
	26	0	0	0	0	0	1

Tableau V- 18 : Calendrier industriel (Cal)

1.1.5.2.2. Paramètres d'optimisation

Le principal paramétrage consiste à définir un objectif de décrémentation. Il s'agit de sélectionner les objets, majeurs et/ou optionnels, retenus comme éléments de comparaison pour la minimisation de l'écart entre les pseudos à supprimer et les ordres de fabrication qui les remplacent. Ce choix conditionne la formation des familles de véhicules pour la comparaison. Dans notre exemple, nous faisons le choix d'une maille de décrémentation ne regroupant que les objets majeurs (motorisation et niveau d'équipement).

Les autres paramètres sont les poids et les pénalités de « sur-décrémentation » des critères des objets retenus dans la maille de décrémentation. Nous supposons que les poids ainsi que les pénalités sont équivalents et égaux à 1.

1.1.5.2.3. Résultats d'optimisation

En sortie de cette optimisation, nous obtenons les volumes de pseudo-véhicules à décrémenter exprimés à la maille de décrémentation (Cf. Tableau V- 19).

		NE1			NE2			NE2		
		Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3	Mo1	Mo2	Mo3
Semaines Industrielles	1	213	315	0	95	583	160	0	44	110
	2	328	467	0	141	881	235	0	62	179
	3	278	418	0	132	765	204	0	52	160
	4	360	415	0	96	917	212	0	43	192
	5	122	318	0	130	400	164	0	62	63
	6	0	177	0	94	93	90	0	42	0
	7	0	197	0	104	104	100	0	47	0
	8	0	197	0	106	102	100	0	47	0
	9	0	101	0	55	52	49	0	24	0
	10	0	23	0	16	9	9	0	4	0
	11	0	22	0	14	10	10	0	4	0
	12	0	24	0	16	11	9	0	3	0
	13	0	21	0	15	10	9	0	4	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau V- 19 : Pseudos véhicules à défalquer définis selon les objectifs de décrémentation

Le passage à la définition complète des pseudos à défalquer se fait à travers l'enrichissement des pseudos par les critères d'objets non retenus dans la maille de décrémentation (ici les objets optionnels). L'enrichissement se fait proportionnellement au taux des critères dans la population de VCD issue de la construction des prévisions en véhicules complètement définis (Cf. Tableau V- 20).

Le plan directeur de fabrication de véhicules est construit en soustrayant de la prévision en VCD les pseudos à défalquer et en ajoutant les ordres de fabrication (Cf. Tableau V- 21).

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Version	Rad	Clim	Semaine Industrielle																									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
			Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans
1	Sans	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sans	Avec	24	41	28	54	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	189	287	250	306	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Sans	Avec	7	7	13	13	9	3	6	4	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	51	86	77	63	54	31	33	35	16	3	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Sans	Avec	29	44	43	48	31	18	29	20	9	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	228	330	285	291	224	125	129	138	73	17	15	17	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Sans	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Sans	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Sans	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Sans	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Sans	Avec	110	179	160	192	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau V- 20 : Pseudos-véhicules à défalquer complètement définis

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Version	Rad	Clim	Semaine Industrielle																										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	Avec	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Avec	Avec	52	77	61	72	81	68	78	77	55	51	59	60	61	68	65	58	54	42	65	52	54	54	54	58	66	60	63
2	Sans	Sans	307	379	401	343	430	452	450	451	425	395	386	386	384	366	369	376	380	301	357	370	368	370	386	378	384	381	
	Avec	Avec	15	18	16	29	24	13	19	14	15	16	19	16	15	10	9	11	6	6	20	15	20	11	16	17	17	13	
	Sans	Sans	67	93	93	95	100	94	93	104	96	99	127	119	122	93	82	95	98	71	99	81	101	105	94	106	103	99	
3	Avec	Avec	306	362	375	390	359	398	364	382	427	494	469	472	463	416	425	411	402	347	399	411	408	392	441	417	424	431	
	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Avec	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Avec	Avec	7	5	9	4	4	4	7	2	6	8	8	6	5	3	14	7	5	9	3	5	10	16	7	11	10	13	
	Sans	Sans	19	24	28	34	15	17	13	14	25	24	19	32	23	27	26	27	27	26	25	33	30	27	28	27	35	30	
5	Avec	Avec	17	15	21	34	18	13	14	15	14	21	25	29	20	30	26	25	23	24	27	30	26	32	36	31	20	22	
	Sans	Sans	56	82	62	96	48	42	35	36	60	69	72	55	75	87	81	88	92	58	90	77	79	70	81	83	87	87	
	Avec	Avec	249	311	361	317	387	365	338	324	319	364	318	366	314	277	311	288	289	228	297	283	294	345	304	319	312	304	
6	Sans	Sans	276	361	339	349	401	473	486	495	440	454	476	455	488	429	387	428	401	334	431	387	393	370	417	425	421	431	
	Avec	Avec	216	260	247	235	260	247	232	235	227	202	260	219	218	186	207	176	182	164	189	207	202	189	211	193	216	184	
	Sans	Sans	202	255	242	228	272	291	332	335	328	324	288	303	322	258	246	259	279	215	229	269	257	246	284	279	267	297	
7	Avec	Avec	112	146	134	151	127	132	136	145	153	167	182	155	169	135	143	145	139	124	136	138	145	137	148	143	167	167	
	Sans	Sans	21	28	37	32	34	42	45	40	38	37	42	58	44	37	40	30	41	29	38	40	43	30	41	34	30	38	
	Avec	Avec	69	86	91	92	88	93	86	84	90	128	108	116	119	88	92	93	98	70	94	92	72	107	100	105	93	85	
8	Sans	Sans	19	22	23	24	22	26	22	20	27	28	27	31	28	31	15	22	12	17	23	21	31	17	25	32	24	24	
	Avec	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	Avec	Avec	184	227	223	210	262	258	262	262	240	240	240	240	240	233	233	233	233	186	221	221	224	228	247	247	247	247	
	Sans	Sans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Avec	Avec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tableau V- 21 : Plan directeur de fabrication de véhicules (OF et PS)

1.1.5.3. Commentaires sur la construction du plan directeur de fabrication de véhicules

L'algorithme de défalcation vise à garantir la stabilité des prévisions en véhicules complètement définis suite à l'introduction des ordres de fabrication dans le PDFV. Le remplacement des pseudos-véhicules par les ordres de fabrication ne se fait pas par comparaison unitaire mais par une confrontation globale sur la base des objets sélectionnés pour la comparaison.

Le choix des objets, qui servent de base à la comparaison, est essentiel pour préserver l'information en entrée. Il est évident que la défalcation se fait au détriment des objets non pris en compte dans la recherche de la solution optimale. Pour les objets majeurs, les contraintes appliquées en amont du processus de construction du plan directeur de fabrication de véhicules, visent à garantir la présence d'un nombre de pseudos-véhicules cohérent avec le nombre d'ordres de fabrication pour chaque critère. Si les critères d'objets majeurs ne sont pas retenus comme base de comparaison pour la suppression des pseudos, une nouvelle déformation de la demande commerciale vient s'ajouter à celles introduites par la construction des prévisions en versions et par la génération de véhicules complètement définis.

La pondération accorde une importance supérieure à certains critères, mais présente le risque de déformer les prévisions sur les autres critères. La pénalité de sur-décrémentation vise à favoriser la sur-représentativité d'un critère plutôt qu'une sous-représentativité. La contrainte de conservation du nombre de véhicules complètement définis fait qu'obligatoirement certains critères seront sous-représentés. Le niveau de représentativité dépend des valeurs relatives des pénalités.

1.2. Simulation

Pour tester la validité des éléments évoqués en commentaire de chaque sous-processus de déclinaison de la demande commerciale, nous avons réalisé une série de simulations sur des scénarios. La construction d'un scénario consiste à soumettre une situation de référence¹ à une série de perturbations potentielles identifiées en commentaires de chaque sous-processus et jugées réalistes par les experts. Une perturbation peut correspondre à un changement de paramétrage, une distorsion des données d'entrée ou les deux en même temps. Les étapes de calcul du scénario 1, ayant servies à illustrer le fonctionnement du processus, sont alors conduites pour chaque scénario.

¹ Le premier scénario de référence est le scénario 1 présenté en exemple d'illustration.

Le Tableau V- 22 caractérise les scénarios testés en signalant, au niveau de chaque ligne, les différences avec le scénario de référence qui sert de base de comparaison.

Les résultats de simulation sont appréciés selon deux propriétés : la déformation du signal d'entrée au sein d'un même scénario et la variabilité des sorties de chaque sous-processus d'un scénario relativement à un scénario de référence. Connaissant les perturbations appliquées à un scénario, la comparaison des résultats de simulation se fait selon le principe que toute chose étant égal par ailleurs. Cette démarche n'est possible que dans une situation où nous disposons d'un contrôle total sur les variables et paramètres de chaque scénario. C'est la principale raison qui nous a poussés à opter pour des scénarios construits sur la base de jeux de données fictifs ; la complexité des cas réels aurait fait avorter toute tentative d'analyse visant à isoler les causes de déformation et d'instabilité des prévisions.

Nous détaillons, par sous-processus, les effets locaux des perturbations simulées et leurs conséquences sur le plan directeur de fabrication de véhicules obtenu en fin de parcours. L'analyse de sensibilité se fait du point de vue de la déformation au sein d'un même scénario et de l'instabilité appréciée par comparaison de deux scénarios.

Scénarios		Sous-processus de déclinaison de la demande commerciale en véhicules complètement définis														
Scénario de référence		DC - RIDC				RIDC - RIDCD			RIDCD - Prévisions en Version		Prévisions en versions - prévisions en VCD	Prévisions en VCD - Plan directeur de fabrication de véhicules				
		Plan de production	Demande commerciale ¹	Capacités	Ordre d'optimisation	Documentation ²	Documentation	Calendriers	Pondération de l'historique	Taux historiques	Taux historiques	Documentation	Série de Nombre aléatoires	Critères de défalcation	Pondération des critères	Pondération de surdécrémentation
2	1												≠			
3	1	+10%											≠			
4	1		≈5-10%										≠			
5	1			-10%									≠			
6	1												≠			
7	9							-1 JO en S14					≠			
8	9							0,1					≠			
9	1							10					≠			
10	1								≈5-10%				≠			
11	1								V5=1%	V5=1%		Rad en option sur V8	≠			
12	1											Rad en série sur V5	≠			
13	4									≈5-10%			≠	Rad. Cimm		
14	13												≠	Rad. Cimm		
15	14												=		Rad=10	
16	1												=	Rad. Cimm		
17	4				NE → Mo	NE1 </> Mo2							≠			
18	17				Mo → NE								≠			
19	1					NE3 </> Mo1 en mois 2 et 3	NE3 </> Mo1 en S9			V7=1%	V7=1%	V7 en S9	≠			
20	1					NE2 </> Mo3 en S9,10,11,12						Pas de V6 en S9,10,11,12	≠			

Tableau V- 22 : Scénarios simulés

¹ Le signe « ≈ » fait référence au taux de variation absolu moyen de la demande commerciale relativement au scénario de référence.

² Les signes « <> » et « </> » signifient respectivement compatible et incompatible d'un point de vue documentaire.

1.2.1. Analyse des facteurs de déformation

Les facteurs de déformation sont les causes qui sont à l'origine des distorsions que subit la demande commerciale lorsqu'elle est interprétée à travers le processus de sa déclinaison.

La notion de déformation s'apprécie au niveau des objets majeurs. Dans cette première partie de l'analyse nous tentons de pister, pas à pas, les déformations que subit la demande commerciale au fur et à mesure de son interprétation par le processus de déclinaison de la demande commerciale.

1.2.1.1. Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale

Le niveau de déformation est tributaire de la cohérence de la demande commerciale avec la documentation, les contraintes capacitaires et les ordres de fabrication positionnés. De ce point de vue, le scénario 1 a été construit dans le souci de garantir une grande cohérence entre ces éléments¹. Il est normal que la demande commerciale soit déformée suite à la construction de la réponse industrielle car il s'agit de rendre compatible la demande du commerce avec les contraintes industrielles. Néanmoins, l'ampleur de la déformation que subit la demande commerciale peut plus ou moins être importante en fonction de l'ordre de passage des objets majeurs par l'optimisation.

Ce constat est d'autant plus vrai lorsqu'il y a une forte dépendance documentaire entre certains critères d'objets majeurs. C'est la raison pour laquelle nous avons testé l'impact du choix de l'ordre d'optimisation sur les scénarios 17 et 18 où la motorisation Mo2 et le niveau d'équipement NE1 sont incompatibles ce qui a pour conséquence de rendre plus dépendant le niveau d'équipement NE1 avec le niveau de motorisation Mo1.

Le tableau ci-dessous fait apparaître le taux de variation relative entre la réponse industrielle à la demande commerciale et la demande commerciale.

¹ Dans la réalité, seule la cohérence documentaire est assurée au niveau de la demande commerciale. Il n'est aucunement garanti que les autres données d'entrée soient cohérentes entre elles.

					Mois calendaires					
		Moyenne	Min	Max	1	2	3	4	5	6
Scénario 17	Mo1	11,22%	6,79%	18,17%	8,22%	13,67%	18,17%	6,79%	7,89%	12,56%
	Mo2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Mo3	12,69%	7,67%	19,61%	9,95%	15,78%	19,61%	7,67%	8,62%	14,54%
	NE1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	NE2	0,92%	0,00%	4,64%	0,21%	0,60%	4,64%	0,00%	0,08%	0,00%
Scénario 18	Mo1	11,22%	6,79%	18,17%	8,22%	13,67%	18,17%	6,79%	7,89%	12,56%
	Mo2	4,30%	2,62%	6,84%	3,19%	5,21%	6,84%	2,62%	2,97%	4,94%
	Mo3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	NE1	48,43%	45,46%	52,75%	45,46%	49,63%	52,75%	46,21%	47,37%	49,15%
	NE2	36,78%	33,81%	43,53%	33,81%	36,85%	43,53%	34,30%	34,99%	37,24%
	NE3	4,42%	0,00%	21,72%	1,07%	3,30%	21,72%	0,00%	0,41%	0,00%

Tableau V- 23 : Taux de variation entre la réponse industrielle à la demande commerciale et la demande commerciale

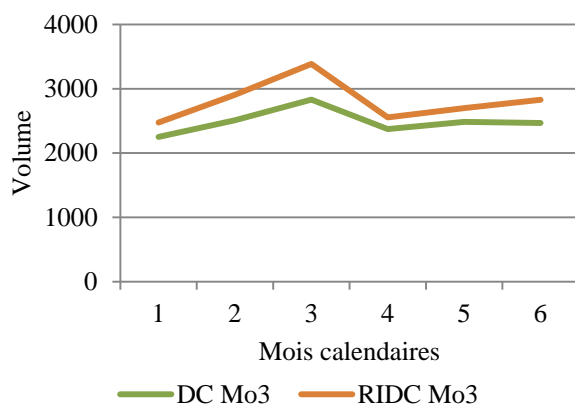


Figure V- 6 : Demande commerciale et réponse industrielle à la demande commerciale pour Mo3 dans le scénario 17

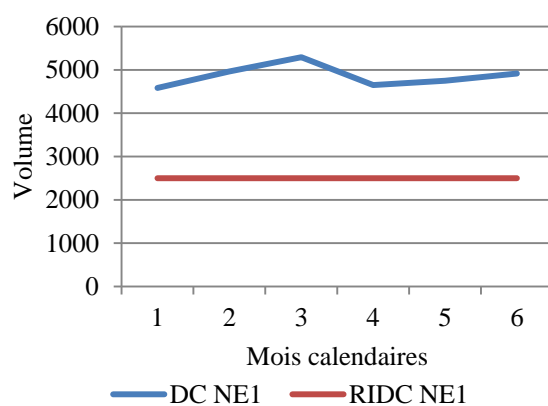


Figure V- 7 : Demande commerciale et réponse industrielle à la demande commerciale pour NE1 dans le scénario 18

La variation moyenne sur les niveaux d'équipement est beaucoup plus importante dans le scénario 18 où la motorisation passe en premier par l'optimisation. Elle passe de 1,78% en moyenne sur les trois niveaux d'équipement dans le scénario 17 à 29,88% dans le scénario 18. Dans une moindre mesure, le constat inverse peut être fait pour les motorisations dont le niveau de variation moyen passe de 7,97% dans le scénario 17 à 5,17% dans le scénario 18.

L'explication vient du fait que la contrainte documentaire impose un volume de niveau d'équipement NE1 égal au volume de la motorisation Mo1 soumise à une contrainte de capacité. Cette relation, n'étant pas symétrique, a plus de conséquence sur le niveau de variation du niveau d'équipement que celle de la motorisation.

Dans ce cas précis, l'ordre d'optimisation NE → Mo donne de meilleurs résultats que l'ordre Mo → NE. Dans un cas plus général, où le nombre d'objets majeurs est plus important, l'ordre d'optimisation peut avoir un impact plus ou moins prononcé sur la

déformation de la demande commerciale en fonction du type de contraintes en vigueur et de la nature des liens documentaires entre les critères.

La position particulière, à l’interface des directions commerciales et industrielles, qu’occupe le sous-processus de construction de la réponse industrielle à la demande commerciale confère à ses données de sortie un rôle contractuel. Sans consensus autour de la RIDC et en l’absence *a priori* de « bon » ordre d’optimisation, les déformations engendrées par ce sous-processus seront incontrôlées et ignorées de la planification commerciale qui s’appuiera sur une demande commerciale incohérente avec les informations utilisées pour la planification industrielle.

1.2.1.2. Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale

Pour mettre en évidence l’effet que peut avoir l’incohérence documentaire entre la maille hebdomadaire de la réponse industrielle découpée et la maille mensuelle de la réponse industrielle, nous avons renseigné dans le scénario 20 une documentation non homogène à l’intérieur des mois calendaires 2 et 3. Nous avons considéré que la motorisation Mo3 et le niveau d’équipement NE2 sont incompatibles en semaines industrielles 9,10, 11 et 12.

La règle documentaire, utilisée par Renault, spécifie que toute documentation valide sur au moins une des semaines du mois l’est aussi sur le mois. La motorisation Mo3 et le niveau d’équipement NE2 sont compatibles sur les semaines 5, 6, 7 et 8 du mois 2 et sur la semaine 13 du mois 3.

Les taux de variation absolue entre la RIDCD consolidée au mois calendaire et la RIDC sont présentés dans le tableau ci-dessous. Afin d’inhiber l’effet potentiel des contraintes capacitaires et d’ordre de fabrication, nous avons relaxé ces dernières.

	Mois Calendaires					
	1	2	3	4	5	6
Mo1	0,74%	5,01%	8,76%	0,83%	1,51%	0,32%
Mo2	1,18%	1,74%	3,94%	0,88%	1,51%	0,68%
Mo3	0,99%	0,48%	0,58%	0,87%	1,83%	0,81%
NE1	1,04%	6,40%	25,65%	0,93%	1,62%	0,55%
NE2	1,11%	2,27%	3,52%	2,69%	2,03%	2,29%
NE3	1,17%	11,07%	76,98%	8,60%	1,23%	8,96%

Tableau V- 24 : Taux de variation entre la réponse industrielle à la demande commerciale découpée et la réponse industrielle à la demande commerciale

Les chiffres du tableau dénotent une forte variation en mois 3 qui comporte le plus de semaines avec une documentation non cohérente avec celle utilisée pour le calcul de la réponse industrielle à la demande commerciale.

On remarque que Mo3 et NE2 présentent de faibles variations par rapport aux autres critères d'objets majeurs. Ce résultat contre-intuitif s'explique par l'effet des contraintes documentaires qu'implique l'incompatibilité entre Mo3 et NE2 et l'ordre d'optimisation des objets.

Quelle que soit la méthode utilisée, l'étape de la découpe est indispensable pour assurer un pilotage de la CL-amont sur un découpage temporel fin. Sans cohérence documentaire entre la maille hebdomadaire et la maille mensuelle, la découpe de la RIDC déforme sensiblement les données d'entrée. Le découpage mensuel doit constituer une unité documentaire homogène.

1.2.1.3. Construction des prévisions en versions

Pour ce sous-processus, nous analysons l'effet d'un changement de pondération des taux historiques sur la construction des prévisions en versions. Le scénario qui sert de référence est le scénario 9 avec un poids des taux historiques égal à 1. Nous testons un poids égal à 0,1 et 10 dans les scénarios 7 et 8 respectivement. Les taux historiques utilisés dans les scénarios 7, 8 et 9 ne sont pas parfaitement cohérents avec la demande commerciale, ce qui est souvent le cas dans la réalité.

Le Tableau V- 25 montre des taux de variation plus importants lorsque la valeur du poids accordé à l'historique augmente. Les taux de variation ne sont pas proportionnels à la valeur du poids (le taux de variation n'est pas multiplié par 10 lorsqu'on passe du scénario 9 au scénario 8), ce qui les rend difficilement prévisibles en dehors d'une approche par simulation. Les effets de seuil, qu'impliquent les contraintes capacitaires, peuvent avoir comme conséquence de limiter l'effet d'une modification des paramètres d'optimisation comme c'est le cas pour la motorisation Mo1.

La Figure V- 8 et la Figure V- 9 illustrent, respectivement, la déformation de la réponse industrielle à la demande commerciale découpée pour la motorisation Mo3 et le niveau d'équipement NE3 dans les scénarios 7, 8 et 9.

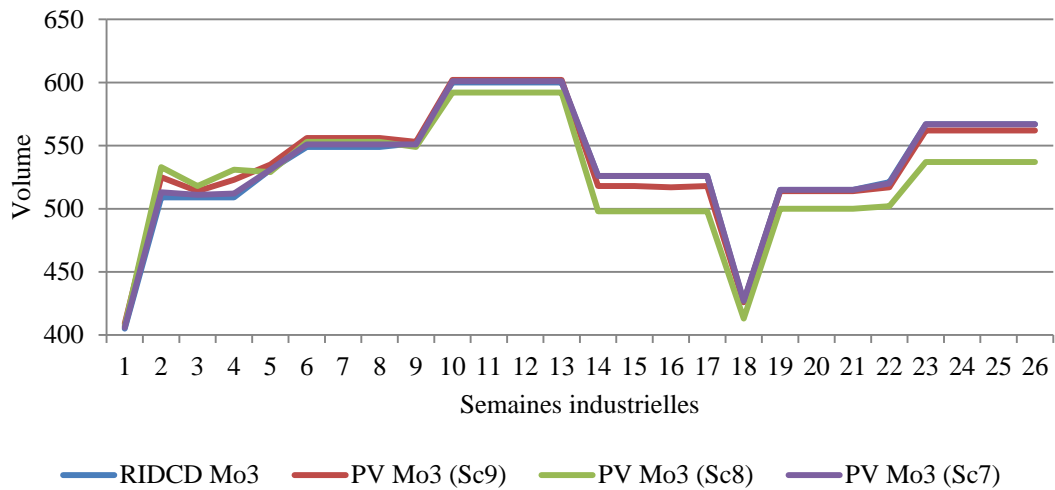


Figure V- 8 : Réponse industrielle à la demande commerciale et prévisions en versions pour Mo3

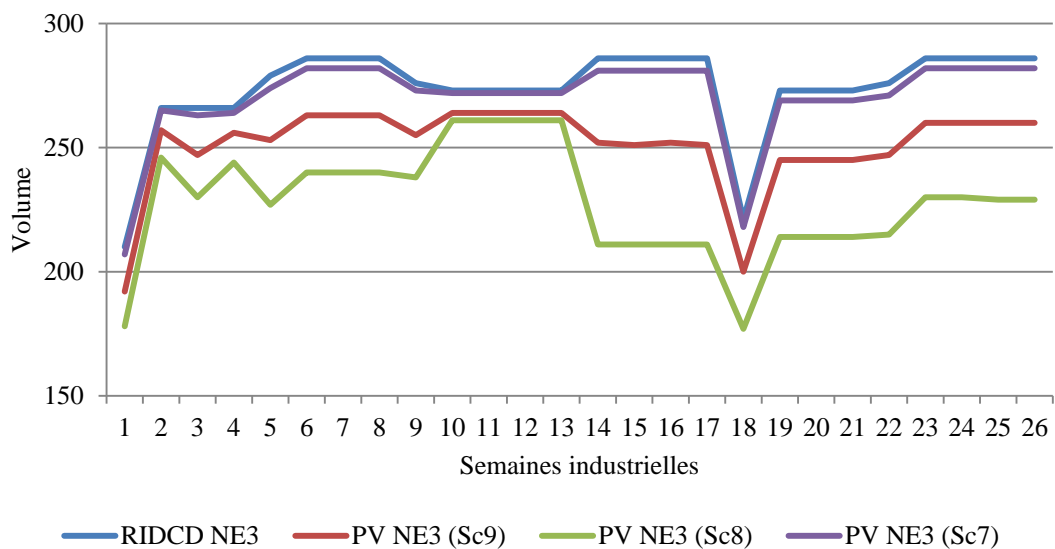


Figure V- 9 : Réponse industrielle à la demande commerciale et prévisions en versions pour NE3

La construction des prévisions en version déforme les données d'entrée issues de la RIDCD. Plus la pondération des taux historiques est forte, au détriment de la RIDCD, plus la déformation des données d'entrée par la construction des prévisions en versions est importante.

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Scenario	Mo1			Mo2			Mo3			NE1			NE2			NE3		
	9	8	7	9	8	7	9	8	7	9	8	7	9	8	7	9	8	7
Poids	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1
Moyenne	0,80%	0,86%	0,13%	0,35%	0,82%	0,07%	0,97%	2,99%	0,17%	4,03%	9,62%	0,63%	1,10%	3,14%	0,15%	8,17%	16,68%	1,25%
Min	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,38%	3,48%	8,57%	0,49%	0,57%	1,89%	0,06%	3,30%	4,40%	0,37%
Max	2,41%	2,41%	0,70%	1,34%	2,07%	0,22%	3,14%	5,32%	0,79%	4,48%	10,55%	0,70%	1,81%	4,55%	0,31%	12,24%	26,22%	1,81%
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,21%	0,07%	0,00%	0,99%	0,49%	0,25%	3,87%	9,11%	0,62%	1,02%	3,23%	0,16%	8,57%	15,24%	1,43%
2	1,37%	2,23%	0,00%	1,34%	2,07%	0,22%	3,14%	4,72%	0,79%	3,66%	8,70%	0,49%	1,81%	4,30%	0,31%	3,38%	7,52%	0,38%
3	2,06%	2,23%	0,17%	0,95%	1,23%	0,17%	0,98%	1,77%	0,39%	3,95%	9,19%	0,49%	1,37%	3,62%	0,19%	7,14%	13,53%	1,13%
4	1,54%	2,23%	0,17%	1,29%	1,96%	0,22%	2,75%	4,32%	0,59%	3,66%	8,79%	0,49%	1,75%	4,24%	0,25%	3,76%	8,27%	0,75%
5	0,51%	0,51%	0,34%	0,37%	0,05%	0,11%	0,75%	0,38%	0,00%	4,07%	9,66%	0,66%	1,07%	3,02%	0,18%	9,32%	18,64%	1,79%
6	0,00%	0,00%	0,00%	0,30%	0,15%	0,05%	1,28%	0,73%	0,36%	4,04%	9,56%	0,64%	1,15%	3,27%	0,11%	8,04%	16,08%	1,40%
7	0,00%	0,00%	0,00%	0,30%	0,15%	0,05%	1,28%	0,73%	0,36%	4,04%	9,56%	0,64%	1,15%	3,27%	0,11%	8,04%	16,08%	1,40%
8	0,00%	0,00%	0,00%	0,30%	0,15%	0,05%	1,28%	0,73%	0,36%	4,04%	9,56%	0,64%	1,15%	3,27%	0,11%	8,04%	16,08%	1,40%
9	1,74%	1,74%	0,70%	0,56%	0,36%	0,15%	0,18%	0,54%	0,18%	4,01%	9,61%	0,56%	1,27%	3,75%	0,17%	7,61%	13,77%	1,09%
10	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,44%	0,00%	0,33%	1,33%	0,17%	3,48%	8,57%	0,54%	1,59%	4,55%	0,22%	3,30%	4,40%	0,37%
11	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,44%	0,00%	0,33%	1,33%	0,17%	3,48%	8,57%	0,54%	1,59%	4,55%	0,22%	3,30%	4,40%	0,37%
12	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,44%	0,00%	0,33%	1,33%	0,17%	3,48%	8,57%	0,54%	1,59%	4,55%	0,22%	3,30%	4,40%	0,37%
13	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,44%	0,00%	0,33%	1,33%	0,17%	3,48%	8,57%	0,54%	1,59%	4,55%	0,22%	3,30%	4,40%	0,37%
14	2,41%	2,41%	0,17%	0,34%	0,79%	0,06%	1,52%	5,32%	0,00%	4,48%	10,55%	0,70%	0,63%	1,89%	0,06%	11,89%	26,22%	1,75%
15	2,41%	2,41%	0,17%	0,34%	0,79%	0,06%	1,52%	5,32%	0,00%	4,48%	10,55%	0,70%	0,57%	1,89%	0,06%	12,24%	26,22%	1,75%
16	2,41%	2,41%	0,17%	0,28%	0,79%	0,06%	1,71%	5,32%	0,00%	4,48%	10,55%	0,70%	0,63%	1,89%	0,06%	11,89%	26,22%	1,75%
17	2,41%	2,41%	0,17%	0,34%	0,79%	0,06%	1,52%	5,32%	0,00%	4,48%	10,55%	0,70%	0,57%	1,89%	0,06%	12,24%	26,22%	1,75%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,07%	0,97%	0,00%	0,00%	3,05%	0,23%	4,17%	9,82%	0,61%	0,92%	2,69%	0,08%	9,50%	19,91%	1,36%
19	0,89%	0,89%	0,35%	0,17%	0,62%	0,06%	0,19%	2,91%	0,00%	4,33%	10,16%	0,70%	0,88%	2,59%	0,13%	10,26%	21,61%	1,47%
20	0,89%	0,89%	0,35%	0,17%	0,62%	0,06%	0,19%	2,91%	0,00%	4,33%	10,16%	0,70%	0,88%	2,59%	0,13%	10,26%	21,61%	1,47%
21	0,89%	0,89%	0,35%	0,17%	0,62%	0,06%	0,19%	2,91%	0,00%	4,33%	10,16%	0,70%	0,88%	2,59%	0,13%	10,26%	21,61%	1,47%
22	1,23%	1,23%	0,35%	0,17%	0,68%	0,06%	0,77%	3,65%	0,19%	4,31%	10,13%	0,70%	0,88%	2,52%	0,13%	10,51%	22,10%	1,81%
23	0,00%	0,00%	0,00%	0,32%	1,67%	0,05%	0,88%	5,29%	0,00%	4,08%	9,77%	0,66%	0,95%	2,73%	0,12%	9,09%	19,58%	1,40%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,32%	1,67%	0,05%	0,88%	5,29%	0,00%	4,08%	9,87%	0,66%	0,95%	2,79%	0,12%	9,09%	19,58%	1,40%
25	0,00%	0,00%	0,00%	0,32%	1,67%	0,05%	0,88%	5,29%	0,00%	3,98%	9,87%	0,66%	0,89%	2,73%	0,12%	9,09%	19,93%	1,40%
26	0,00%	0,00%	0,00%	0,32%	1,67%	0,05%	0,88%	5,29%	0,00%	4,08%	9,87%	0,66%	0,95%	2,73%	0,12%	9,09%	19,93%	1,40%

Tableau V- 25 : Taux de variation entre la prévision en version et la réponse industrielle à la demande commerciale découpées

1.2.1.4. Construction des prévisions en véhicules complètement définis

Cette étape du processus ne comporte pas de facteur de déformation des prévisions au niveau des objets majeurs. La prévision en version, obtenue lors de l'étape précédente, contraint la génération des véhicules complètement définis. Les volumes par version sont conservés.

1.2.1.5. Construction du plan directeur de fabrication de véhicules

Dernière étape du processus de déclinaison de la demande commerciale en véhicules complètement définis, la construction du plan directeur de fabrication de véhicules consiste à décrétement les prévisions en véhicules complètement définis de telle sorte à ce que les véhicules fictifs supprimés soient ressemblants aux ordres de fabrication qu'ils sont censés représenter.

Le choix des objectifs de décrémentation est la décision clé de cette étape. Il spécifie la base de comparaison entre les ordres de fabrication et les pseudos véhicules. La déformation du signal d'entrée est plus importante sur les objets non pris en compte dans les objectifs de décrémentation. Nous comparons les scénarios 1 et 16 pour rendre compte de ce phénomène.

Dans le scénario 1, c'est le couple (motorisation, niveau d'équipement) qui sert de maille de décrémentation. Dans le scénario 16, nous simulons un cas extrême dans lequel aucun objet majeur n'est retenu dans la maille de décrémentation. Le Tableau V- 26 et le Tableau V- 27 résument les résultats de simulation pour la motorisation et le niveau d'équipement.

Le scénario 1 présente des taux de variation extrêmement faibles. Dans le scénario 16, ils augmentent sensiblement et leurs valeurs varient sur l'horizon de planification. On remarque que la moyenne calculée sur les 13 premières semaines, qui comportent des ordres de fabrication, est près de deux fois plus élevée que la moyenne calculée sur tout l'horizon de planification¹. Dans le scénario 16, le coefficient de corrélation entre le taux de variation et le taux d'OF par semaine² montre que plus il y a d'OF positionnés sur une semaine donnée plus le taux de variation est élevé sur les objets non pris en compte dans les objectifs de décrémentation.

¹ Les 13 dernières semaines de l'horizon de planification présentent des taux de variation nuls car aucun ordre de fabrication n'est positionné sur cet horizon.

² Est le rapport entre le volume d'OF et le volume du plan de montage par semaine.

CHAPITRE V. ANALYSE DES PROCESSUS DE DÉCLINAISON DE LA DEMANDE COMMERCIALE ET DE CALCUL DES BESOINS

Scénario	Mo1		Mo2		Mo3		
	1	16	1	16	1	16	
Moyenne calculées sur les 26 semaines	0,00%	1,06%	0,01%	0,81%	0,03%	1,87%	
Moyenne calculées sur les 13 premières semaines	0,00%	2,11%	0,02%	1,62%	0,06%	3,75%	
Coefficient de corrélation entre le taux de variation et le taux d'OF par semaine	-	87,06%	-	78,84%	-	61,89%	
Semaines Industrielles	1	0,00%	3,28%	0,07%	3,60%	0,25%	6,90%
	2	0,00%	4,12%	0,00%	1,62%	0,00%	2,54%
	3	0,00%	2,06%	0,00%	2,97%	0,00%	6,07%
	4	0,00%	4,47%	0,06%	1,73%	0,20%	2,35%
	5	0,00%	3,02%	0,05%	3,34%	0,00%	10,09%
	6	0,00%	2,35%	0,00%	2,24%	0,00%	6,65%
	7	0,00%	1,68%	0,00%	1,83%	0,00%	6,12%
	8	0,00%	3,52%	0,05%	2,49%	0,00%	6,47%
	9	0,00%	0,00%	0,00%	0,41%	0,00%	0,36%
	10	0,00%	1,23%	0,00%	0,15%	0,17%	0,17%
	11	0,00%	0,70%	0,00%	0,10%	0,17%	0,17%
	12	0,00%	0,53%	0,00%	0,34%	0,00%	0,50%
	13	0,00%	0,53%	0,00%	0,24%	0,00%	0,33%
	14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	17	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	19	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	21	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	26	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau V- 26 : Taux de variation entre la prévision en véhicules complètement définis et le plan directeur de fabrication de véhicules pour les motorisations

Scénario		NE1		NE2		NE3	
		1	16	1	16	1	16
Moyenne calculées sur les 26 semaines		0,01%	1,43%	0,01%	1,69%	0,00%	4,72%
Moyenne calculées sur les 13 premières semaines		0,03%	2,85%	0,02%	3,38%	0,00%	9,44%
Coefficient de corrélation entre le taux de variation et le taux d'OF par semaine		-	78,95%	-	81,61%	-	77,40%
Semaines Industrielles	1	0,00%	6,38%	0,00%	6,88%	0,00%	12,96%
	2	0,00%	2,87%	0,00%	3,63%	0,00%	13,55%
	3	0,00%	5,84%	0,00%	6,32%	0,00%	11,76%
	4	0,10%	3,46%	0,06%	4,20%	0,00%	14,34%
	5	0,09%	4,17%	0,00%	5,78%	0,00%	21,68%
	6	0,09%	4,40%	0,06%	4,54%	0,00%	13,29%
	7	0,00%	4,21%	0,00%	4,65%	0,00%	15,03%
	8	0,09%	4,76%	0,00%	4,99%	0,00%	15,03%
	9	0,00%	0,56%	0,00%	1,04%	0,00%	2,14%
	10	0,00%	0,36%	0,05%	0,33%	0,00%	0,37%
	11	0,00%	0,00%	0,05%	0,38%	0,00%	0,00%
	12	0,00%	0,00%	0,00%	0,66%	0,00%	1,83%
	13	0,00%	0,09%	0,00%	0,49%	0,00%	0,73%
	14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	17	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	19	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	21	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	25	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	26	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau V- 27 : Taux de variation entre la prévision en véhicules complètement définis et le plan directeur de fabrication de véhicules pour les niveaux d'équipement

Les déformations introduites par cette étape du processus de déclinaison de la demande commerciale affectent les critères d'objets majeurs non retenus dans les objectifs de décrémentation. Les périodes comportant le plus d'OF sont celles qui présentent les taux de variations les plus forts.

1.2.2. Analyse des facteurs d'instabilité

Par facteur d'instabilité ou de variabilité, nous entendons les causes qui sont à l'origine des écarts de prévisions observés suite à deux exécutions successives du processus de déclinaison de la demande commerciale. Les facteurs d'instabilité affectent non seulement les critères d'objets majeurs, mais aussi les critères d'objets optionnels ainsi que les composants de jonction.

Nous identifierons les causes d'instabilité à travers la comparaison des résultats de simulation d'un scénario de référence à ceux d'un autre scénario en supposant que les changements de scénarios s'effectuent dans un fonctionnement dynamique. La comparaison

portera sur quelques cas d'emploi de composants à différents niveaux de chaque sous-processus.

1.2.2.1. Construction de la réponse industrielle à la demande commerciale

Deux phénomènes sont généralement à l'origine de la variabilité observée au niveau de la construction de la RIDC. Le premier concerne les variations de volume du plan de montage. Le second concerne les altérations qui impactent la répartition du volume du plan de montage sur les critères d'objets majeurs au niveau de la demande commerciale. Dans ce dernier cas, nous parlerons de variation du mix de la demande commerciale.

Nous testons tour à tour ces deux stimuli pour apprécier le comportement du processus de déclinaison de la demande commerciale et son aptitude à fournir des résultats relativement stables.

1.2.2.1.1. Variation du volume du plan de montage

Nous testons ici une révision à la hausse du volume du plan de montage. Nous comparons le scénario de référence 1 au scénario 3 qui présente une augmentation de 10% du volume du plan de montage sur chaque période en conservant le mix¹ utilisé dans le scénario 1. Les taux de variation moyens calculés pour quelques cas d'emploi, à des niveaux du processus où l'information est disponible, sont présentés dans le Tableau V- 28.

Nous observons qu'au niveau de la réponse industrielle à la demande commerciale le taux de variation n'est pas identique pour tous les cas d'emploi correspondant aux critères d'objets majeurs. Les contraintes de capacités impliquent un effet de seuil qui minimise les variations pour Mo1 et NE3². D'un autre côté, la nécessité de satisfaire les volumes du plan de montage engendre des taux de variations supérieurs au pourcentage d'augmentation du volume du plan de montage pour les critères non contraints.

¹ Cette augmentation de 10% du volume du plan de montage se traduit par une augmentation identique du volume de chaque critère d'objet majeur au niveau de la demande commerciale.

² Les contraintes de respect des volumes d'ordres de fabrication jouent le même rôle que les contraintes capacitaires lorsque le plan de montage est revu à la baisse.

	Demande Commerciale	Réponse industrielle à la demande commerciale	Réponse industrielle à la demande commerciale découpée	Prévision en versions	Prévision en véhicules complètement définis	Plan directeur de fabrication de véhicules
Mo1	10,00%	1,32%	0,80%	0,72%	0,72%	0,72%
Mo2	10,00%	12,70%	12,72%	12,56%	12,56%	12,57%
Mo3	10,00%	10,00%	10,49%	11,12%	11,12%	11,11%
NE1	10,00%	10,00%	10,00%	10,10%	10,10%	10,10%
NE2	10,00%	11,45%	11,47%	11,51%	11,51%	11,51%
NE3	10,00%	1,40%	1,17%	0,68%	0,68%	0,68%
Mo1^NE1	-	-	-	3,76%	3,76%	3,22%
Mo1^NE2	-	-	-	8,63%	8,63%	6,83%
Mo2^NE1	-	-	-	14,68%	14,68%	15,30%
Mo2^NE2	-	-	-	12,42%	12,42%	12,15%
Mo2^NE3	-	-	-	10,54%	10,54%	9,12%
Mo3^NE2	-	-	-	17,19%	17,19%	17,34%
Mo3^NE3	-	-	-	2,88%	2,88%	2,75%
Rad	-	-	-	-	7,94%	8,00%
Sauf Rad	-	-	-	-	10,78%	10,76%
Clim	-	-	-	-	10,48%	10,44%
Sauf Clim	-	-	-	-	9,49%	9,54%
Rad^Clim	-	-	-	-	7,91%	7,92%
Mo1^NE1^Clim	-	-	-	-	3,68%	2,92%
Mo2^NE2^Clim^Rad	-	-	-	-	13,69%	13,11%
Mo1^NE2^Clim^Rad	-	-	-	-	20,04%	16,76%

Tableau V- 28 : Taux de variation moyens entre le scénario 3 et le scénario 1

Les cas d'emploi correspondant à des combinaisons d'objets majeurs présentent des taux de variations compris entre 2,88% et 17,19%. Les taux de variation les plus élevés correspondent aux cas d'emploi comprenant le critère Mo2 dont le taux de variation est le plus élevé au niveau de la RIDC.

Les critères d'objets optionnels présentent des taux de variation proches du pourcentage d'augmentation de la demande commerciale. Ce comportement s'explique par la transversalité des critères d'objets optionnels au niveau de la documentation. Cette transversalité implique des phénomènes de compensation qui limitent l'amplification d'une variation appliquée en amont du sous-processus de prévision en véhicules complètement définis.

Les cas d'emploi de composants de jonction présentent des taux de variation qui varient fortement en fonction des critères qui les composent.

La variabilité qu'implique une augmentation du volume du plan de montage est difficilement prévisible et n'a pas les mêmes conséquences sur tous les critères ou combinaisons de critères. Selon que les critères soient contraints ou pas, le processus de déclinaison de la demande commerciale tend à contenir ou à amplifier les variations de volume de la demande commerciale.

1.2.2.1.2. Variation du mix de la demande commerciale

Nous nous intéressons ici à l'effet d'une déformation du mix de la demande commerciale sur le comportement du processus de déclinaison de la demande commerciale. Nous comparons les scénarios 4 et 1. Dans le scénario 4, nous simulons une déformation de la demande commerciale selon les taux de variation relatifs du tableau ci-dessous.

	1	2	3	4	5	6
Mo1	10,79%	9,08%	9,23%	9,66%	9,58%	12,38%
Mo2	-6,04%	-6,53%	-6,43%	-6,35%	-7,00%	-6,46%
Mo3	5,78%	9,28%	8,48%	7,67%	9,82%	4,70%
NE1	8,05%	8,72%	7,98%	9,98%	9,03%	10,68%
NE2	-7,66%	-4,83%	-7,57%	-3,82%	-6,41%	-6,23%
NE3	8,74%	-8,46%	7,89%	-20,66%	-1,33%	-10,12%

Tableau V- 29 : Taux de variation relatif de la demande commerciale

Le Tableau V- 30 contient les taux de variation moyens en valeur absolue du scénario 4 relativement au scénario 1 calculés à différents niveaux du processus.

	Demande Commerciale	Réponse industrielle à la demande commerciale	Réponse industrielle à la demande commerciale découpée	Prévision en versions	Prévision en véhicules complètement définis	Plan directeur de fabrication de véhicules
Mo1	11,28%	1,32%	0,80%	0,72%	0,72%	0,72%
Mo2	6,07%	3,33%	3,33%	1,89%	1,89%	1,89%
Mo3	8,29%	10,05%	10,56%	5,71%	5,71%	5,71%
NE1	9,99%	9,99%	9,98%	6,46%	6,46%	6,45%
NE2	5,72%	6,20%	6,21%	4,07%	4,07%	4,07%
NE3	8,93%	3,00%	2,51%	1,21%	1,21%	1,21%
Mo1^NE1	-	-	-	8,72%	8,72%	7,71%
Mo1^NE2	-	-	-	23,80%	23,80%	20,90%
Mo2^NE1	-	-	-	4,81%	4,81%	5,69%
Mo2^NE2	-	-	-	3,61%	3,61%	4,09%
Mo2^NE3	-	-	-	42,39%	42,39%	38,88%
Mo3^NE2	-	-	-	3,76%	3,76%	4,46%
Mo3^NE3	-	-	-	9,18%	9,18%	8,50%
Rad	-	-	-	-	2,38%	2,29%
Sauf Rad	-	-	-	-	0,91%	0,87%
Clim	-	-	-	-	1,12%	1,15%
Sauf Clim	-	-	-	-	1,20%	1,23%
Rad^Clim	-	-	-	-	2,09%	2,01%
Mo1^NE1^Clim	-	-	-	-	8,65%	7,29%
Mo2^NE2^Clim^Rad	-	-	-	-	5,19%	5,69%
Mo1^NE2^Clim^Rad	-	-	-	-	27,80%	22,84%

Tableau V- 30 : Taux de variation moyens entre le scénario 4 et le scénario 1

Les taux de variation en entrée sont altérés par l'effet des contraintes de capacité. Les cas d'emplois « Mo1^NE2 » et « Mo2^NE3 », faisant référence aux versions 4 et 8 dont les prévisions de demande sont relativement faibles, subissent des variations moyennes en valeur absolue qui sont respectivement de 23,80% et de 42,39%. Les critères Mo2 et NE3 présentent des taux de variations faibles en valeur absolue au niveau de la RIDCD. Le sens de variation

n'étant pas le même pour les deux critères sur l'horizon de planification, l'impact sur le cas d'emploi « Mo2^NE3 » est important.

Les critères d'objets optionnels subissent des variations relativement faibles du fait de leur transversalité.

L'effet des contraintes capacitaires joue un rôle essentiel dans l'amplification ou l'atténuation des variations de la DC lors de la construction de la RIDC. Au-delà de la RIDCD, qui fournit des résultats cohérents avec la RIDC, il devient très difficile d'interpréter les niveaux de variation observés qui dans certains cas atteignent près de 40% au niveau du PDFV.

1.2.2.2. Découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale

Les modifications dans les calendriers, testées dans le scénario 6, peuvent avoir des conséquences importantes et non homogène sur les taux de variation des composants.

La fermeture d'une journée de la semaine 14 et le report des volumes sur les périodes adjacentes du mois 4 sont à l'origine des taux de variation de la RIDCD présentés dans le tableau ci-dessous.

	Semaine industrielle			
	14	15	16	17
Mo1	17%	2%	2%	2%
Mo2	17%	4%	4%	4%
Mo3	17%	6%	6%	6%
NE1	17%	4%	4%	4%
NE2	17%	5%	5%	5%
NE3	16%	0%	0%	0%

Tableau V- 31 : Taux de variation de la RIDCD entre le scénario 6 et le scénario 1

Compte tenu du fait qu'une seule des 6 journées initialement travaillées dans le scénario 1 a été fermée dans le scénario 2, le taux de variation en semaine 14 est équivalent à 1/6. La répartition par critères du volume reporté sur les semaines 15, 16 et 17 dépend des contraintes de capacité.

Les variations se propagent le long du processus de déclinaison de la demande commerciale pour générer des variations au niveau du plan directeur de fabrication de véhicules comme présenté ci-dessous.

	Semaine industrielle			
	14	15	16	17
Mo1	17%	3%	3%	3%
Mo2	17%	4%	4%	4%
Mo3	16%	5%	5%	5%
NE1	17%	4%	4%	4%
NE2	17%	5%	5%	5%
NE3	16%	0%	0%	0%
Mo1^NE1	17%	3%	3%	3%
Mo1^NE2	17%	1%	1%	1%
Mo2^NE1	17%	5%	5%	5%
Mo2^NE2	17%	5%	5%	5%
Mo2^NE3	15%	11%	11%	11%
Mo3^NE2	16%	8%	8%	8%
Mo3^NE3	16%	3%	3%	3%
Rad	16%	3%	3%	3%
Sauf Rad	17%	4%	4%	5%
Clim	16%	4%	4%	4%
Sauf Clim	17%	4%	4%	4%
Rad^Clim	13%	4%	1%	5%
Mo1^NE1^Clim	16%	2%	2%	2%
Mo2^NE2^Clim^Rad	12%	4%	4%	13%
Mo1^NE2^Clim^Rad	55%	14%	11%	23%

Tableau V- 32 : Taux de variation du plan directeur de fabrication de véhicules entre le scénario 6 et le scénario 1

Du fait des contraintes de capacité et des modalités de report des volumes de production, les conséquences d'un changement de calendrier sont difficilement prévisibles au niveau des programmes de production. On note, par exemple, que le cas d'emploi « Mo1^NE2^Clim^Rad » subit une variation de l'ordre de 55% tandis que le taux de variation est inférieur à 1/6 pour le cas d'emploi « Mo2^NE2^Clim^Rad ».

Pour que les modifications de calendrier n'aient pas de conséquences sur les approvisionnements, il est indispensable d'anticiper les fermetures ou les ouvertures de journées de travail ainsi que les changements de quarts de travail. Le délai d'anticipation doit être au moins égal au cumul des délais d'obtention de composant le plus long.

1.2.2.3. Construction des prévisions en versions

Dans le scénario 10, nous testons la règle de gestion arbitraire qui consiste à attribuer à une version un taux de 1% lorsque le taux historique n'est pas disponible.

Nous supposons l'inexistence de taux historique pour la version 5 et pour les critères d'option connaissant la version 5. Nous confrontons les résultats de simulation au scénario 1 où ces taux sont disponibles.

Les taux de version et de critères d'option connaissant une version interviennent respectivement au niveau du sous-processus de prévision en version et de prévision en

véhicules complètement définis ; il n’y a donc pas d’écart observé au niveau de la RIDC et de la RIDCD.

Dans le tableau ci-dessous, sont présentés les taux de variations absolus au niveau des sous-processus de prévisions en version, de prévisions en véhicules complètement définis et de construction du plan directeur de fabrication de véhicules.

	Prévision en versions	Prévision en véhicules complètement définis	Plan directeur de fabrication de véhicules
Mo1	1%	1%	1%
Mo2	8%	8%	8%
Mo3	25%	25%	25%
NE1	13%	13%	13%
NE2	8%	8%	8%
NE3	1%	1%	1%
Mo1^NE1	31%	31%	24%
Mo1^NE2	98%	98%	75%
Mo2^NE1	45%	45%	39%
Mo2^NE2	45%	45%	41%
Mo2^NE3	274%	274%	252%
Mo3^NE2	85%	85%	81%
Mo3^NE3	57%	57%	53%
Rad		16%	14%
Sauf Rad		6%	5%
Clim		39%	33%
Sauf Clim		42%	35%
Rad^Clim		18%	14%
Mo1^NE1^Clim		31%	32%
Mo2^NE2^Clim^Rad		89%	76%
Mo1^NE2^Clim^Rad		129%	97%

Tableau V- 33 : Taux de variation moyens entre le scénario 10 et le scénario 1

Les résultats montrent un comportement inattendu de l’algorithme de calcul de prévisions en versions. La version 5 (Mo2^NE2), dont le taux historique a été fixé à 1%, présente un taux de variations inférieur à ceux relevés pour les versions 2 (Mo1^NE2) et 8 (Mo2^NE3).

La somme des taux historiques devant être égal à 1, la fixation à 1% du taux de la version 5 déforme la distribution des taux sur l’ensemble des autres versions. Les volumes issus de la RIDCD, identiques pour les scénarios 1 et 10, viennent compenser cette déformation. Les versions dont les taux historiques dans le scénario 1 sont les plus faibles sont celles qui subissent le plus, en taux de variation, les conséquences de la règle de gestion des taux historiques manquants.

Entre le moment où elle est appliquée et le moment où elle cesse de l’être, la règle de gestion, consistant à attribuer à une version un taux de 1% lorsque le taux historique n’est pas disponible, introduit de l’instabilité au niveau du PDFV. La variabilité observée ne touche pas

seulement les cas d'emploi faisant intervenir les critères des versions directement concernées par la règle de gestion des taux historique manquants.

1.2.2.4. Construction des prévisions en véhicules complètement définis

Nous commençons par tester les effets du tirage aléatoire puis ceux d'une modification de la documentation au niveau des critères d'objets optionnels.

1.2.2.4.1. Tirage aléatoire

Nous comparons, au niveau des sous-processus de construction des prévisions en véhicules complètement définis et de construction du plan directeur de fabrication de véhicules, les résultats des simulations sur le scénario 1 et 2 qui se différencient par la seule séquence de nombres aléatoires ayant servies au tirage des VCD selon la méthode de Monte-Carlo.

	Prévision en véhicules complètement définis	Plan directeur de fabrication de véhicules
Mo1	0,00%	0,00%
Mo2	0,00%	0,02%
Mo3	0,00%	0,06%
NE1	0,00%	0,01%
NE2	0,00%	0,01%
NE3	0,00%	0,00%
Mo1^NE1	0,00%	0,00%
Mo1^NE2	0,00%	0,00%
Mo2^NE1	0,00%	0,03%
Mo2^NE2	0,00%	0,02%
Mo2^NE3	0,00%	0,00%
Mo3^NE2	0,00%	0,10%
Mo3^NE3	0,00%	0,00%
Rad	0,05%	0,09%
Sauf Rad	0,02%	0,02%
Clim	0,07%	0,05%
Sauf Clim	0,08%	0,07%
Rad^Clim	1,65%	1,54%
Mo1^NE1^Clim	0,84%	0,62%
Mo2^NE2^Clim^Rad	4,29%	3,89%
Mo1^NE2^Clim^Rad	17,87%	15,58%

Tableau V- 34 : Taux de variation moyens entre le scénario 2 et le scénario 1

L'actualisation des probabilités conditionnelles après chaque tirage, ne permet pas de calculer analytiquement l'écart type des prévisions des cas d'emploi. Nous avons réalisé une simulation de Monte-Carlo de génération de VCD sur 1000 itérations pour mesurer l'écart type des volumes associés au cas d'emplois « Mo1^NE1^Clim », « Mo2^NE2^Clim^Rad » et « Mo1^NE2^Clim^Rad ».

	Volume moyen de la version	Probabilité conditionnelle du critère Rad	Probabilité conditionnelle du critère Clim	Produit des probabilités conditionnelles	Prévision moyenne du cas d'emploi	Écart type de la prévision du cas d'emploi	Écart type /Moyenne
Mo1^NE1^Clim	437	-	0,1	0,1	43,91	0,27	0,0061
Mo2^NE2^Clim^Rad	1192	0,29	0,63	0,1827	219,56	7,58	0,0345
Mo1^NE2^Clim^Rad	141	0,34	0,355	0,1207	16,88	2,63	0,15580

Tableau V- 35 : Résultat de simulation de génération de VCD

Nous remarquons que, malgré une prévision moyenne relativement faible pour le cas d'emploi « Mo1^NE1^Clim », le taux de variation moyen entre le scénario 2 et 1 reste très faible. Les résultats de la simulation de Monte-Carlo, synthétisés dans le Tableau V- 35, montrent que pour ce cas d'emploi la prévision reste stable et concentrée autour de la moyenne avec un écart type de 0,27.

Pour le cas d'emploi « Mo2^NE2^Clim^Rad » l'écart type est de 7,58 avec une dispersion autour de la moyenne équivalente à celle du cas d'emploi « Mo2^NE2^Clim^Rad ». L'indicateur qui mesure le rapport entre l'écart type et la moyenne des prévisions donne la même indication que le taux de variation moyen observé entre le scénario 2 et 1 ; plus ce rapport est élevé, plus le taux de variation l'est.

En plus du volume de la prévision moyenne du cas d'emploi, le nombre d'objets du cas d'emploi joue un rôle dans l'explication des taux de variation ; plus un cas d'emploi fait intervenir d'objets plus sa variabilité sera prononcée.

1.2.2.4.2. Modification de la documentation

Pour tester un changement de documentation au niveau des critères d'objets optionnels, nous avons simulé les scénarios 11 et 12 en y faisant respectivement passer la radio en option sur la version 8 et en série sur la version 5.

	Scénario 11		Scénario 12	
	Prévision en véhicules complètement définis	Plan directeur de fabrication de véhicules	Prévision en véhicules complètement définis	Plan directeur de fabrication de véhicules
Mo1	0%	0%	0%	0%
Mo2	0%	0%	0%	0%
Mo3	0%	0%	0%	0%
NE1	0%	0%	0%	0%
NE2	0%	0%	0%	0%
NE3	0%	0%	0%	0%
Mo1^NE1	0%	0%	0%	0%
Mo1^NE2	0%	0%	0%	0%
Mo2^NE1	0%	0%	0%	0%
Mo2^NE2	0%	0%	0%	0%
Mo2^NE3	0%	0%	0%	0%
Mo3^NE2	0%	0%	0%	0%
Mo3^NE3	0%	0%	0%	0%
Rad	0%	0%	104%	89%
Sauf Rad	0%	0%	40%	34%
Clim	0%	0%	0%	0%
Sauf Clim	0%	0%	0%	0%
Rad^Clim	1%	1%	87%	74%
Mo1^NE1^Clim	0%	0%	0%	0%
Mo2^NE2^Clim^Rad	3%	3%	245%	208%
Mo1^NE2^Clim^Rad	21%	18%	20%	16%

Tableau V- 36 : Taux de variation moyens entre le scénario 11 et le scénario 1 et entre le scénario 12 et le scénario 1

Le passage de la radio en option sur la version 8 dans le scénario 11 ne crée pas plus de variations que la génération aléatoire de VCD. Le taux historique égal à 1 pour la radio sur cette version annule l'effet d'un choix possible d'une version 8 sans radio dans la documentation.

Par opposition, dans le scénario 12 on observe de fortes variations sur tous les cas d'emploi contenant la radio. Le passage de la radio en série, alors qu'elle était en option sur la version 5 avec un taux historique de 0,37, génère de grosses variations sur le cas d'emploi « Mo2^NE2^Clim^Rad ». De telles variations ne peuvent être gérées en dehors d'une anticipation suffisamment précoce des changements documentaires.

1.2.2.5. Construction du plan directeur de fabrication de véhicules

Nous testons ici un changement de pondération des critères de décrémentation en attribuant un poids de 10 au critère Rad dans le scénario 15 (ce poids est de 1 dans le scénario 14)

Les variations observées sur les 5 premières semaines au niveau des programmes de production entre les scénarios 14 et le scénario 15 sont consignées dans le tableau ci-dessous.

	Semaines industrielles				
	1	2	3	4	5
Mo1	6%	0%	3%	0%	0%
Mo2	1%	0%	0%	0%	0%
Mo3	1%	0%	1%	0%	0%
NE1	7%	0%	3%	0%	0%
NE2	2%	0%	1%	0%	0%
NE3	2%	0%	1%	0%	0%
Mo1^NE1	8%	0%	4%	0%	0%
Mo1^NE2	1%	0%	1%	0%	0%
Mo2^NE1	6%	0%	3%	0%	0%
Mo2^NE2	3%	0%	1%	0%	0%
Mo2^NE3	2%	0%	1%	0%	0%
Mo3^NE2	0%	0%	0%	0%	0%
Mo3^NE3	2%	0%	1%	0%	0%
Rad	3%	0%	2%	0%	0%
Sauf Rad	4%	0%	2%	0%	0%
Clim	1%	0%	1%	0%	0%
Sauf Clim	2%	0%	1%	0%	0%
Rad^Clim	2%	0%	1%	0%	0%
Mo1^NE1^Clim	0%	0%	0%	0%	0%
Mo2^NE2^Clim^Rad	3%	0%	1%	0%	0%
Mo1^NE2^Clim^Rad	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau V- 37 : Taux de variation du plan directeur de fabrication de véhicules entre le scénario 14 et le scénario 15

La confrontation des résultats de simulation des scénarios 14 et 15 dénote une sensibilité de l’algorithme de décrémentation par rapport aux changements de pondération des critères. Les variations apparaissent sur les premières périodes de l’horizon où le nombre d’OF est important. Elles affectent principalement les critères non pris en compte dans les objectifs de décrémentation (les critères d’objets majeurs dans ces deux scénarios).

2. Processus de calcul et d’expression des besoins

Le processus de calcul et d’expression des besoins traduit, à l’aide des cas d’emplois des composants et pièces approvisionnés, le plan directeur de fabrication de véhicules successivement en besoins bruts puis en besoins nets puis en demandes de livraisons.

Le cas d’emploi permet d’identifier les véhicules complètement définis qui utilisent un composant sur un intervalle de temps donné. La mise en évidence du lien entre un cas d’emploi et un nombre de VCD pour lesquels ce cas d’emploi est avéré, passe par la résolution du problème de « satisfiabilité » pour chaque composant. La résolution de ce problème consiste à vérifier si l’expression logique associée à chaque VCD vérifie l’expression logique du cas d’emploi de la pièce à laquelle on s’intéresse.

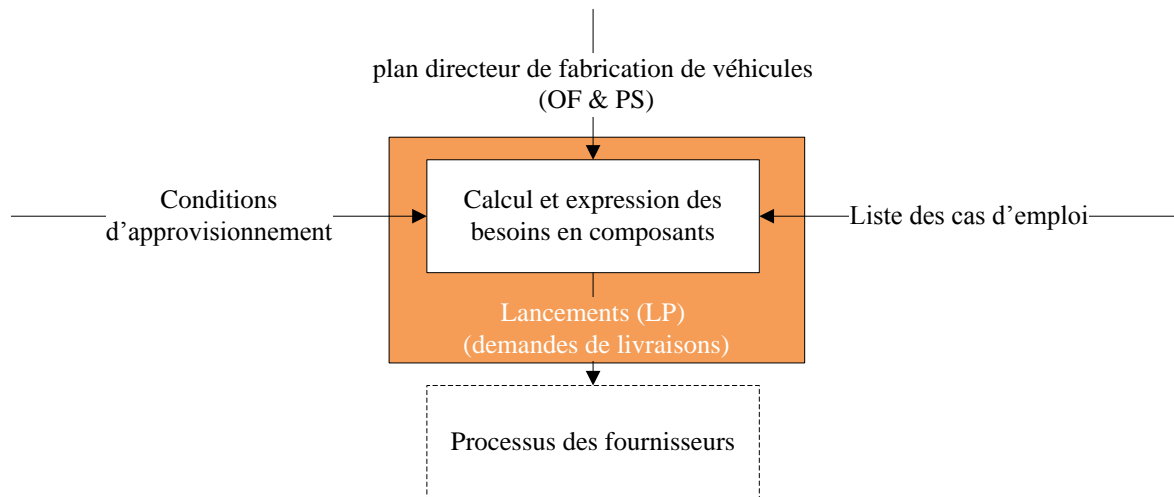


Figure V- 10 : Processus de calcul et d'expression des besoins

Le besoin brut obtenu sert à alimenter un calcul classique de type MRP où les conditions d'approvisionnement regroupent les paramètres de délais d'obtention, de stock de sécurité, de délai de sécurité et d'arrondi d'emballage¹.

2.1.1. Modélisation

Dans cette partie du processus, nous ne nous intéressons pas au problème de « satisfiabilité ». Nous supposons l'existence d'une fonction $SAT(h/VCD)$ permettant de spécifier la compatibilité du cas d'emploi d'un composant h avec l'expression logique d'un véhicule complètement défini quelconque.

$$\left\{ \begin{array}{l} SAT(h/VCD)=1 \text{ si l'expression logique du VCD vérifie l'expression logique du cas} \\ \text{d'emploi du composant } h \text{ avec } h=1..H \\ SAT(h/VCD)=0 \text{ sinon} \end{array} \right.$$

Sur une période de temps, correspondant à l'unité de découpage temporel de l'horizon de planification, le nombre de véhicule complètement définis correspond au volume du plan de montage V_s . Pour initier le calcul de MRP, ce volume doit être traduit en besoins bruts pour chaque composant.

Nous adopterons les notations suivantes :

v_s : $v^{\text{ème}}$ VCD de la période s avec $v_s = 1..V_s$

h : $h^{\text{ème}}$ composant avec $h=1..H$

¹ Pour éviter d'encombrer les relations de la MRP, nous n'intégrons pas l'arrondi d'emballage dans le calcul

C_h : Coefficient de monte du composant h

$BB_{h,s}$: Besoin brut du composant h en semaine s

$BN_{h,s}$: Besoin net du composant h en semaine s

L_h : Délai d'obtention du composant h

$SS_{h,s}$: Stock de sécurité du composant h en semaine s

$SD_{h,s}$: Stock détenu du composant h en fin de semaine s

$PS_{h,s}$: Position de stock du composant h en fin de semaine s

$LP_{h,s}$: Lancement en production (demande de livraison) du composant h en début de semaine s

$q_{h,s}$: Quantité livrée en début de semaine s avec $LP_{h,s} = q_{h,s+L_h}$

Le calcul de MRP sur une période se fait en deux étapes.

2.1.1.1. Calcul des besoins bruts sur l'horizon de planification

1. $h=1$
2. $s=1$
3. $v_s=1$
4. $BB_{h,s} = BB_{h,s} + C_h \times SAT(h/v_s)$
5. $v_s = v_s + 1$
6. Si $v_s \leq V_s$ aller à 4 sinon aller à 7
7. $s = s + 1$
8. Si $s \leq S$ aller à 3 sinon aller à 9
9. $h = h + 1$
10. Si $h \leq H$ aller à 2 sinon STOP

2.1.1.2. Calcul des lancements en production en semaine s

Nous nous positionnons en début de semaine s pour illustrer le calcul périodique de MRP. Pour chaque composant h , nous calculons un lancement en production avec :

- $BN_{h,s+L_h} = BB_{h,s+L_h} - PS_{h,s+L_h} + SS_{h,s+L_h} - SS_{h,s}$
- $PS_{h,s+L_h} = SD_{h,s} + \sum_{s'=s}^{s+L_h} q_{h,s'} - BB_{h,s'}$
- $LP_{h,s} = BN_{h,s+L_h}$

2.1.2. Illustration numérique

Nous illustrons le calcul et l'expression des besoins sur deux composants dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

	Composant h	
	1	2
Cas d'emploi	Mo2∨Mo3	Mo3 ∧ NE2 ∧ Rad ∧ Clim
Délai d'obtention en semaines (L_h)	2	1
Coefficient de monte (C_h)	1	1

Tableau V- 38 : Caractéristiques des composants

Le premier composant est associé à des critères de l'objet majeur « motorisation ». Le composant $h=1$ est monté sur les véhicules disposant d'une motorisation Mo2 ou d'une motorisation Mo3. Le deuxième composant $h=2$, est un élément de jonction qui fait appel à un cas d'emploi plus complexe que le premier. Ce composant est monté sur les véhicules qui sont équipés d'une motorisation Mo3, d'un niveau d'équipement NE2, d'une radio et de la climatisation¹.

2.1.2.1. Données d'entrée

Le plan directeur de fabrication de véhicules est la donnée d'entrée principale pour le calcul et l'expression des besoins. Sa traduction, selon les cas d'emploi, permet de déduire les besoins bruts des composants à approvisionner. Les autres données d'entrée, synthétisées dans le tableau ci-dessous, concernent les informations nécessaires au calcul de MRP.

Composant h		Stock détenu en $s=0$ ($SD_{h,s}$)	Livraisons attendues ($q_{h,s}$)	
			$s=1$	$s=2$
1	1	190	950	1250
	2	20	100	

Tableau V- 39 : Stock détenu et livraisons attendues

2.1.2.2. Paramètres de calcul

Le paramétrage essentiel à ce niveau concerne le dimensionnement des stocks de sécurité. Dans le standard Renault, le calcul se fait en fonction des paramètres listés dans le

¹ Il s'agit d'un composant de jonction.

Tableau V- 40. Le calcul du stock de sécurité se fait selon une formule empirique appelée

« loi de flexibilité » qui s'écrit comme suit : $SS_{h,s} = K \times \frac{(L_h)^{1/2} \times (Cad_h)^{3/4}}{(JO)^{1/4} \times (P_h)^{1/8}}$ avec :

L_h : Le délai d'obtention du composant h

Cad_h : Cadence nominale hebdomadaire du composant h (calculée à partir des historiques de consommation du composant)

JO : Le nombre de jours ouvrés par semaine

P_h : Prix du composant h

K : Un coefficient permettant d'ajuster le niveau de stock de sécurité selon un taux de service cible (se lit sur des abaques construits empiriquement sur la base de l'expérience).

	Composant	
	$h=1$	$h=2$
Prix du composant en € (P_h)	1	1
Cadence nominale en semaine s ($Cad_{h,s}$)	1200	140

Tableau V- 40 : Paramètres de stock de sécurité

Au stock de sécurité, issu de la loi de flexibilité, vient s'ajouter un délai de sécurité dont le mode de calcul n'est pas standard ; nous ne nous attarderons pas sur cet aspect dans le cadre de cette étude.

2.1.2.3. Résultats du calcul

Le calcul de MRP réalisé en période $s=0$ est présenté ci-dessous pour les composants $h=1$ et $h=2$.

		Composant $h = 1$						Composant $h = 2$							
		Besoins bruts	Livraisons attendues	Position de stock	Stock détenu	Stock de sécurité	Besoins nets	Lancement en production	Besoins bruts	Livraisons attendues	Position de stock	Stock détenu	Stock de sécurité	Besoins nets	Lancement en production
					190							20			
Semaine Industrielle	1	976	950	164			1240	112	100	8				165	
	2	1235	1250	179			1335	146				27	165	134	
	3	1226				193	1240	1187	134				27	134	151
	4	1335				193	1335	1223	151				27	151	127
	5	1187				193	1187	1204	127				27	127	132
	6	1223				193	1223	1202	132				27	132	136
	7	1204				193	1204	1286	136				27	136	145
	8	1202				193	1202	1429	145				27	145	153
	9	1286				193	1286	1431	153				27	153	167
	10	1429				193	1429	1429	167				27	167	182
	11	1431				193	1431	1432	182				27	182	155
	12	1429				193	1429	1295	155				27	155	169
	13	1432				193	1432	1294	169				27	169	135
	14	1295				193	1295	1294	135				27	135	143
	15	1294				193	1294	1294	143				27	143	145
	16	1294				193	1294	1051	145				27	145	139
	17	1294				193	1294	1283	139				27	139	124
	18	1051				193	1051	1283	124				27	124	136
	19	1283				193	1283	1283	136				27	136	138
	20	1283				193	1283	1287	138				27	138	145
	21	1283				193	1283	1363	145				27	145	137
	22	1287				193	1287	1363	137				27	137	148
	23	1363				193	1363	1363	148				27	148	143
	24	1363				193	1363	1363	143				27	143	167
	25	1363				193	1363		167				27	167	167
	26	1363				193	1363		167				27	167	

Tableau V- 41 : calcul de MRP en $s = 0$ pour les composants $h = 1$ et $h = 2$ (LP)

2.1.3. Commentaires sur le processus de calcul et d'expression des besoins

Le calcul de MRP s'alimente d'un plan directeur de fabrication de véhicules obtenu suite à une série d'optimisations en univers certain. Les besoins bruts sont interprétés comme une information certaine alors qu'ils ne sont qu'une des solutions possibles répondant aux diverses contraintes d'optimisation du processus de déclinaison de la demande commerciale. Les lancements en production sont directement impactés par les perturbations qu'impliquent les optimisations successives du processus de déclinaison de la demande commerciale. Les informations qui sont transmises aux fournisseurs, à travers les demandes de livraison prévisionnelles, ne font l'objet d'aucun traitement particulier et sont assimilées à des données certaines malgré la variabilité qui les caractérisent.

Localement, le processus de calcul et d'expression des besoins intègre un stock et un délai de sécurité pour contrer l'aléa. Le délai de sécurité se traduit par un stock qui résulte d'une anticipation de besoins futurs. La fixation des nombreux paramètres de calcul du délai de sécurité est non-standardisée et ne permet pas de faire le lien avec un niveau de service

cible. Le stock de sécurité résulte d'un calcul se basant sur une règle empirique intégrant, entre autres, le prix et la consommation moyenne de la pièce. Par l'introduction d'une dimension pécuniaire dans le calcul des stocks de sécurité, il est implicitement admis que plus une pièce est chère plus le risque de rupture associé doit être élevé. Or les conséquences économiques engendrées par un certain niveau de stock de sécurité dépendent non seulement du prix de la pièce, mais aussi du coût de rupture associé. La figure ci-dessous illustre le niveau de risque de rupture, qu'implique la loi de flexibilité, sur un composant associé à un module alternatif dont la consommation moyenne est de 30% de la production globale de véhicules et dont le délai d'obtention est d'une semaine¹. Le risque est apprécié selon les paramètres de prix et de production globale de véhicules.

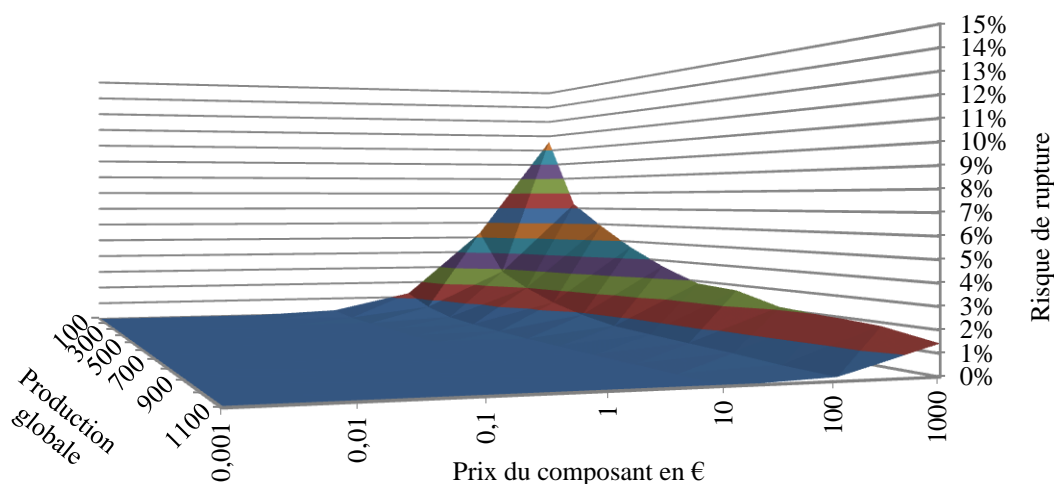


Figure V- 11 : Risque de rupture associé à la loi de flexibilité en fonction du prix du composant et de la production périodique globale

Nous observons que le niveau de risque n'est pas homogène selon le prix du composant et le volume de production globale malgré un taux de monte fixe et un même coefficient d'ajustement K dans la formule de la loi de flexibilité qui fixe le taux de service cible à 95%. Pour un composant, dont le prix est de 1000€, le risque de rupture est de 11% lorsque la production globale hebdomadaire est de 100 produits finis ; pour ce même composant le risque de rupture est de 7% lorsque la production globale hebdomadaire est de 300 produits finis. Cet exemple simple démontre que la couverture contre le risque de rupture par la loi de flexibilité n'est pas maîtrisée. Elle se matérialise, selon les cas, par une surprotection ou une surexposition au risque de rupture.

¹ Le niveau de risque est évalué en considérant que la demande du module alternatif auquel est associé le composant suit une loi binomiale. Ce choix sera justifié en chapitre VI.

Les besoins anticipés, lorsque ces derniers se situent au-delà de l'horizon gelé, doivent faire l'objet d'un traitement particulier puisqu'ils sont susceptibles d'être modifiés au cours du temps. Dans la situation actuelle, aucune distinction n'est faite entre les besoins bruts couverts par l'horizon gelé et ceux situés en dehors ; cela se traduit par une perte en efficacité sur certains composants et une perte en efficacité sur d'autres. Les informations transmises aux fournisseurs contribuent à diffuser une demande instable en équivalent certain qui perturbe la gestion de la production et des approvisionnements en CL - amont. Ces perturbations peuvent être amplifiées par des décisions locales fondées sur des exploitations d'historiques ou sur des logiques de majoration visant à écarter le problème plus en amont dans la CL.

Conclusion

Les étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale en plan directeur de fabrication de véhicules ont tendance à déformer la demande commerciale et à rendre instables les prévisions dans une logique glissante de la planification. Ce comportement, intrinsèque aux méthodes de calcul utilisées, se répète à chaque cycle de programmation et alimente le mécanisme à l'origine de l'ECF illustré par la Figure III- 2. Ce résultat vient confirmer l'analyse en cascade du FAI, réalisée dans le §2, qui fait apparaître une augmentation de la variabilité des prévisions en parcourant les étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale et valider, de ce fait, l'hypothèse de recherche posée en chapitre III. Cette amplification de la variabilité est en partie expliquée par les éléments discutés dans ce chapitre et résumé par ce qui suit.

La construction de la réponse industrielle à la demande commerciale s'appuie sur des optimisations successives par objet. L'interdépendance des objets entre eux, de par les relations documentaires, accorde à l'ordre de passage en optimisation une importance toute particulière. À défaut d'avoir une optimisation globale, il est nécessaire qu'un consensus entre industriels et commerciaux soit établi autour du résultat de la construction de la réponse industrielle qui doit constituer les bases du contrat de planification entre les directions commerciale et industrielle.

La découpe est tributaire de la cohérence entre les informations du découpage mensuel et celles du découpage hebdomadaire de l'horizon de planification. Les intervalles d'homogénéité documentaire et d'application des contraintes ainsi que les règles de passage

du mois calendaire à la semaine industrielle doivent faire l'objet d'une attention toute particulière pour éviter les incohérences entre la réponse industrielle et sa découpe. De même que pour le calcul de la réponse industrielle à la demande commerciale, il s'agit là aussi de renforcer le contrôle des résultats en sortie de ce sous-processus. Nous pouvons envisager une extension du contrat entre parties commerciale et industrielle à cette étape du processus.

La construction des prévisions en versions contribue à déformer l'information qui est en entrée de ce sous-processus en se basant sur une optimisation qui tient compte des historiques de demande et qui n'a pas comme contrainte de respecter strictement le résultat de la découpe. Le choix des poids à accorder à l'information commerciale et à l'historique de demande est très subjectif et conditionne le résultat de cette étape du processus et celui des étapes suivantes. L'utilisation des historiques de demande, justifiable pour une projection à court terme, n'a pas de sens à moyen ou long terme dans une activité marquée par une grande incertitude. Le nombre croissant de versions contribue à rendre instable la sortie de ce sous-processus lorsque les données en entrée sont soumises à de faibles variations où que les paramètres d'optimisation sont modifiés.

La construction de la prévision en véhicules complètement définis s'appuie, en partie, sur des taux historiques de critères d'option par version. Comme pour la construction de prévisions en versions, la question de la validité de ces taux sur l'horizon de planification est sujette à discussion. La stabilité de ce processus dépend de la stabilité du processus en amont et des nombreux paramètres pris en compte dans l'optimisation. De faibles variations au niveau des données d'entrée ou des paramètres peuvent générer de fortes variations en sortie.

Le calcul et expression des besoins représentent un facteur d'instabilité car ne garantissant pas les conditions d'efficacité permettant de limiter les conséquences d'une variation au niveau du plan directeur de fabrication de véhicules. Des stocks de sécurité inadaptés provoquent des pénuries qui engendrent des modifications au niveau du plan directeur de fabrication de véhicules pour le rendre réalisable et/ou des mesures de dépannage d'urgence coûteuses.

En réponse aux questions posées dans le §1, le tableau ci-dessous synthétise les facteurs de déformation de la demande commerciale ainsi que les facteurs d'instabilité associés à chaque étape des processus de déclinaison de la demande commerciale en véhicules complètement définis et de calcul et d'expression des besoins.

Processus		Facteur de déformation	Facteur d'instabilité
Déclinaison de la demande commerciale en véhicules complètement définis	Construction de la RIDC	Ordre d'optimisation des objets majeurs	Variation de la demande commerciale
	Découpe de la RIDC	Incohérence documentaire entre découpage hebdomadaire et découpage mensuel Incohérence entre calendriers industriels et calendaires	Modification des calendriers
	Construction des prévisions en versions	Pondération des historiques de demande de version	Sensibilité aux variations des paramètres et des données en entrée
	Construction des prévisions en VCD		Sensibilité aux variations des paramètres et des données en entrée
	Construction du plan directeur de fabrication de véhicules	Décrémentation sur la base d'objets non-majeurs	Sensibilité aux variations des paramètres et des données en entrée
Calcul et expression des besoins			Exploitation des prévisions en équivalent certain Méthode de sécurisation

Tableau V- 42 : Facteurs de déformation de la demande commerciale et d'instabilité des processus de déclinaison de la demande commerciale et de calcul des besoins

Les algorithmes de calculs détaillés dans ce chapitre présentent la double particularité d'être tributaires des calculs de l'étape précédente et de brasser un grand nombre de données. Ces deux éléments compliquent singulièrement les tentatives d'analyse des variations et d'identification des facteurs qui les engendrent. Les modélisations présentées ici permettent de faire ressortir les comportements intrinsèques et répétitifs de chaque sous-processus et les causes de déformation et/ou d'instabilité qui y sont associées. L'impossibilité de prévoir, *a priori*, dans des conditions réelles la part de variation de chaque étape dans la variation de la demande de livraison rend vaine toute tentative de limitation des conséquences des variations en mettant en place des stocks ou des délais de sécurité.

La logique de construction des prévisions de consommation de pièces, à partir de la demande commerciale, s'appuie sur une structure de nomenclature inverse qui ne se justifie que pour des cas d'emploi faisant référence à des pièces de jonction. L'instabilité des méthodes, utilisées pour l'enrichissement de la demande commerciale en véhicules complètement définis, affecte directement ces composants en exaspérant la variabilité des demandes de livraison qui y sont associées. La déformation de la demande commerciale affecte en premier lieu les objets majeurs et l'ensemble des composants auxquels ils font directement appel à travers le mécanisme d'explosion des nomenclatures. Nous proposons, comme voie d'amélioration, de différencier le mode de gestion des approvisionnements en fonction de la nature du composant.

Pour les composants rattachés à des modules alternatifs ou optionnels, nous proposerons une exploitation directe des informations, issues de la découpe de la réponse industrielle à la

demande commerciale, validée par le commerce, pour une gestion mixte pour stock et sur commande des approvisionnements par niveaux de rechargement (Giard et Sali, 2012). Cette idée sera développée en troisième partie de mémoire.

Les composants de jonction dont le PPC est inclus dans l'horizon gelé doivent faire l'objet d'un approvisionnement sur commande. Pour les autres composants de jonction, une réflexion, pouvant s'inscrire dans la continuité de notre travail, doit être menée pour définir les règles de gestion adéquates. Ce point sera évoqué en conclusion générale où il sera question des perspectives et améliorations à apporter à notre proposition.

TROISIÈME PARTIE

**PILOTAGE D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE AMONT DÉDIÉE
À LA PRODUCTION DE MASSE DE PRODUITS
FORTEMENT DIVERSIFIÉS PAR UNE VERSION
REVISITÉE DE LA MRP**

CHAPITRE VI

PILOTAGE DES FLUX-AMONT PAR L'EXPLOITATION DES INFORMATIONS COMMERCIALES DANS UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer une adaptation de la méthode MRP permettant un pilotage décentralisé efficace des flux-amont dans le cas d'une production de masse de production fortement diversifiée.

Ayant montré en deuxième partie les causes de déformation et d'instabilité inhérentes à la transformation de la DC en PDFV, nous proposons de rendre le calcul des besoins en composants indépendant de certaines étapes du processus de déclinaison de la demande commerciale. En effet, l'exploitation des informations commerciales, non perturbées par les étapes de sa déclinaison en VCD, permet d'envisager une gestion des approvisionnements des modules alternatifs – et des composants qu'ils utilisent – sur la base de nomenclatures de planification. Ce mode de pilotage n'inclut pas les composants de jonction qui doivent faire l'objet d'un traitement particulier.

Nous nous plaçons dans le contexte, fréquemment rencontré, où les commandes des maillons clients aux maillons fournisseurs de la chaîne productive s'effectuent simultanément, avec la même périodicité, les livraisons se faisant au même rythme. Ce mode de fonctionnement est celui de la MRP qui détermine périodiquement et de manière cohérente, le lancement en production des différents composants de la nomenclature des produits finis en garantissant le respect des réquisitions du PDP, lesquelles tirent la production de toutes les unités productives. Dans le contexte retenu, la combinatoire des modules optionnels est grande et la variété des produits finis est trop forte pour que le PDP puisse être défini à ce niveau, sauf sur le très court terme et avec une granularité temporelle plus fine mais on est alors plus sur un problème d'ordonnancement que de planification; au-delà, le PDP est à définir au niveau des modules alternatifs, la personnalisation des produits finis n'étant pas connue.

Cette synchronisation des décisions et livraisons, qui caractérise la MRP, est parfaitement compatible avec un pilotage autonome des centres de production d'une CL complexe. Le pilotage des grandes CLs mondiales peut s'appuyer sur une utilisation de mécanismes de pilotage centralisé, sur des mécanismes contractuels de coordination d'entités productives indépendantes ou sur un panachage de ces deux modes.

Dans l'approche décentralisée, les relations entre clients et fournisseurs se déterminent librement. Le niveau d'anticipation d'un fournisseur sur les demandes à satisfaire est faible, même si des contrats-cadres sont passés pour limiter l'incertitude. Pour honorer une commande, le fournisseur doit disposer des composants et matières premières nécessaires, faute de quoi son client ne recevra pas la livraison espérée, ce qui peut l'empêcher, à son tour, d'honorer les commandes de ses propres clients. Le manque d'anticipation local conduit à des propagations amplifiées de perturbations conduisant à un fonctionnement erratique de la CL. Pour pallier ce défaut d'information, des procédures exceptionnelles de production et de transport sont mobilisées et combinées avec l'emploi de stocks de sécurité. La détermination rationnelle des niveaux de ces stocks de sécurité est délicate car les informations localement disponibles ne sont pas les plus pertinentes. La cohérence décisionnelle de ce pilotage décentralisé est difficile à assurer.

L'approche MRP s'inscrit clairement dans une optique de pilotage centralisé par l'entité qui gère les lignes d'assemblage final. Elle doit être adaptée pour une utilisation dans le cadre d'un pilotage partiellement ou totalement pour stock. Sa mise en œuvre opérationnelle pose des problèmes communs aux approches centralisées, tout en limitant certains d'entre eux, et pose quelques problèmes spécifiques qui seront évoqués en conclusion.

Nous commencerons par examiner comment l'incertitude est prise en compte dans la MRP au travers de ses mécanismes de base que l'on « revisitera » pour faciliter l'introduction de nos propositions, avant d'examiner les apports disponibles dans la littérature sur ce thème, pour identifier les pistes déjà explorées et les lacunes restant à combler pour le type de CL retenu ici. Nous proposerons, dans le §2, un ensemble de relations assurant un pilotage efficace et efficient de productions partiellement ou totalement pour stock dans le cadre de la MRP. Nous les compléterons par des relations permettant de prendre correctement en compte les problèmes de qualité, que la production se fasse pour stock ou à la commande. Dans ce même paragraphe, nous proposerons une optimisation du niveau de risque, paramètre utilisé dans la version revisitée de la MRP. La dernière partie (§3) sera consacrée à une illustration

numérique des relations proposées. Nous concluons sur les conditions de réussite de l'approche proposée.

1. Le traitement de l'incertitude dans la MRP

On commencera par examiner le traitement de l'incertitude par la MRP, dans sa formulation classique, avant d'examiner comment les chercheurs ont tenté de rationaliser des approches empiriques mobilisées pour la prendre en compte.

1.1. Prise en compte de l'incertitude dans l'approche classique de la MRP

Dans ses fondements, la MRP a été mise au point pour établir, en univers certain, les programmes de production d'un ensemble de composants fabriqués par un ensemble d'unités de production garantissant le respect d'un ou plusieurs PDP(s). Le PDP est un échéancier de mise à disposition de biens, correspondant le plus souvent à des produits finis (niveau 0 de la nomenclature), défini sur l'horizon de planification H_P . La MRP-I détermine, par simulation, le lancement au plus tard de tous les composants rentrant dans la composition des produits du PDP en mobilisant un ensemble de mécanismes (explosion des nomenclatures, calcul de besoins nets, lotissement, absorption des délais), le calcul du lancement d'un composant étant nécessairement postérieur à celui de tous les composants ou produits finis qui l'utilisent. La MRP-II ajoute à la MRP-I un mécanisme d'ajustement charge-capacité qui peut conduire à la modification de certaines contraintes capacitaires, à la remise en cause du PDP par retards de mise à disposition de certains composants ou par modifications de décisions de lancement en production antérieurement prises. Dans ce qui suit, on se placera dans un contexte où ne se pose aucun problème d'ajustement charge-capacité, parce que le mécanisme d'élaboration du PDP en garantit la faisabilité (par ajustements préalables de capacité et/ou retards de mise à disposition de certains produits du PDP) ; en outre, le mécanisme du lot-pour-lot est retenu ici. Le processus de calcul de la MRP est déclenché à cadence régulière (planification glissante). Parmi les propositions de lancements en production des références gérées par la MRP, seules les propositions de la première période sont exécutées ; les lancements proposés pour les périodes suivantes peuvent être modifiés lors de calculs ultérieurs de MRP.

Dans sa formulation standard, la MRP traite indirectement de l'incertitude au travers des concepts d'horizon gelé et de nomenclature de planification. Ces éléments seront l'occasion d'introduire de nouvelles perspectives qui seront à la base des développements du §2.

1.1.1. Horizon gelé et PPC

La période de référence, retenue pour définir le PDP et la périodicité des décisions prises dans le cadre de la MRP, est d'amplitude θ . Les délais d'obtention et horizons sont des multiples de cette période de référence. L'horizon gelé H_G est la partie initiale de l'horizon de planification H_P , sur lequel le PDP est défini, allant des périodes t à $t+H_G-1$, sur laquelle les réquisitions sont intangibles. Ce concept est lié à celui du PPC, qui délimite ce qui peut être produit à la commande de ce qui doit l'être pour stock ; ce lien est exposé dans l'article de Giard et Mendy (2007).

L'application en cascade du mécanisme d'explosion des nomenclatures conduit à trouver a_{ik} unités du composant i , du niveau n de la nomenclature, incluses dans le module alternatif k appartenant à \mathcal{E}_i^d , l'ensemble des modules alternatifs exclusifs entre eux utilisés en ligne d'assemblage l nécessitant le composant i . Par ailleurs, l'application en cascade du mécanisme d'absorption des délais conduit à un décalage λ_{ik} entre la période t du lancement en production d'une unité du composant i et la période $t+\lambda_{ik}$ de réquisition du module k dans le PDP. La prise en compte simultanée de ces deux mécanismes permet de lier directement le besoin brut BB_{it} d'un composant i du niveau n de la nomenclature à la période t , aux réquisitions PDP_{kt}^l de modules k sur la ligne d'assemblage l (niveau 0 de la nomenclature) à des dates $t'>t$ et non au lancement en production des références qui consomment ce composant i , comme on le fait normalement en MRP.

En univers certain (PDP non révisable, absence de problèmes de qualité, délais d'obtention certains...), le stock SD_{it} physiquement détenu à la fin de la période t pour n'importe quel composant i doit être nul, parce qu'un stock résiduel génère un coût sans contrepartie utile. La quantité LP_{it} lancée en production pour le composant i au début de la période t est alors nécessairement égale à la quantité $q_{i,t+L_i}$ livrée au début de la période $t+L_i$, compte tenu du délai d'obtention L_i de ce composant i . À son tour, $q_{i,t+L_i}$ est

nécessairement égal au besoin net $BN_{i,t+L_i}$ de cette période, lui-même égal au besoin brut $BB_{i,t+L_i}$ de cette même période. Ces différentes valeurs sont liées aux réquisitions du PDP par la relation [1].

$$LP_{it} = q_{i,t+L_i} = BN_{i,t+L_i} = BB_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{k \in \mathcal{C}_i^l} a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l \quad [1]$$

Le lancement en production du composant i relève d'une production entièrement à la commande si $\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l} (\lambda_{ik}) \leq H_G^l$, ce qui correspond au cas « normal » d'utilisation de la MRP. Il relève d'une production entièrement pour stock si $\forall l, \text{Min}_{k \in \mathcal{C}_i^l} (\lambda_{ik}) > H_G^l$, car toutes les demandes du PDP visées par cette relation sont inconnues. Il relève enfin, d'une production partiellement à la commande et partiellement pour stock si le composant i est lié à au moins un module k monté sur une ligne d'assemblage l telle que $\lambda_{ik} \leq H_G^l$ et à au moins à un module k' monté sur une ligne d'assemblage l' (l' pouvant être identique à l) telle que $\lambda_{ik'} > H_G^{l'}$. Ce dernier cas de figure, non traité à notre connaissance dans la littérature de la MRP, est devenu très fréquent dans les grandes CLs d'étendue mondiale, comme c'est le cas dans l'automobile.

L'entreprise qui veut piloter à la commande la production d'un ensemble de composants fabriquées sur différents sites, dans le cadre de la CL qu'il anime, ne peut donc le faire que si elle dispose de PDPs définis tel que $\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l} (\lambda_{ik}) \leq H_G^l$. La tendance au remplacement de fournisseurs de composants d'un niveau élevé dans la nomenclature, par des fournisseurs plus attractifs du point de vue des coûts d'achat mais plus lointains géographiquement, peut conduire insidieusement, par l'allongement des λ_{ik} qu'il induit, au non-respect de cette condition et perturber le pilotage de la CL si les règles de pilotage ne sont pas correctement adaptées.

1.1.2. Nomenclature de planification

Dans la production de masse de produits fortement diversifiés, le PDP d'une ligne d'assemblage ne peut être défini qu'au niveau des composants alternatifs ou optionnels, la variété finale étant trop forte pour pouvoir l'être à celui du produit fini. La nomenclature de

planification (appelée encore nomenclature modulaire) $\vec{c}_{\mathcal{E}^l}$ d'un ensemble \mathcal{E}^l de K modules alternatifs ($card(\mathcal{E}^l) = K$) montés sur une même ligne d'assemblage l décrit la structure moyenne d'utilisation de ces modules alternatifs par un ensemble de produits finis assemblés sur cette même ligne. Les éléments de ce vecteur $\vec{c}_{\mathcal{E}^l}$ correspondent aux proportions moyennes c_k de consommation des modules $k \in \mathcal{E}^l$; bien évidemment, $\sum_{k=1}^{k=K} c_k = 1$.

Cette nomenclature de planification est parfois utilisée pour définir les réquisitions du PDP hors horizon gelé mais ces informations ne sont pas fiables dans une assertion certaine. Il est préférable de considérer ces demandes comme aléatoires et d'utiliser ce vecteur $\vec{c}_{\mathcal{E}^l}$ comme un vecteur de probabilités d'utilisation des modules alternatifs à utiliser en régime de croisière sur la ligne d'assemblage l (Camisulis et Giard, 2010). Dans ce cadre, le vecteur $\vec{X}_{\mathcal{E}^l}$ des demandes quotidiennes de modules alternatifs suit la loi Multinomiale¹ $\mathcal{M}(N_l, \vec{c}_{\mathcal{E}^l})$, dans laquelle N_l est la production quotidienne de la ligne l . La demande quotidienne X_k du module $k \in \mathcal{E}^l$ suit la loi Binomiale $\mathcal{B}(N_l, c_k)$, l'événement complémentaire étant « autres modules alternatifs ».

1.2. L'incertitude en MRP dans la littérature

La méthode MRP a été initialement conçue pour être mise en œuvre dans un environnement déterministe ; aucune méthode de sécurisation n'est initialement imaginée. La confrontation de cette perception idéalisée de la planification au monde réel a mis en évidence la nécessité de prendre en charge, dans le cadre du modèle MRP, l'aspect incertain des informations exploitées dans la construction du PDP et la déclinaison des besoins à des niveaux de nomenclatures successifs par les mécanismes combinés d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais. Les sources d'aléa, pouvant perturber le bon déroulement d'une MRP, sont nombreuses et se combinent rendant inopérant tout modèle de planification dans son acception certaine.

¹ Rappelons que la loi Multinomiale est une généralisation de la loi Binomiale laquelle n'envisage que deux événements exclusifs épuisant l'ensemble des événements possibles pouvant intervenir à l'issue d'une épreuve. La loi Multinomiale envisage le cas de k événements exclusifs épuisant l'ensemble des événements possibles. Ces deux distributions se définissent par un nombre d'épreuves N . La loi Binomiale a comme second argument la probabilité de l'événement privilégié par l'utilisateur de cette loi. La loi Multinomiale a comme arguments complémentaires, les probabilités associés aux k événements (mises sous une forme vectorielle ici).

On a vu apparaître, dès la fin des années soixante-dix, des tentatives d'adaptation de la méthode MRP à un environnement incertain en introduisant des règles de gestion empiriques rendant délicate toute tentative de généralisation ou de théorisation.

La première source d'incertitude à avoir été étudiée est celle relative la demande. Büchel (1982) considère que la demande en produits finis est une variable aléatoire dont l'espérance et la variance sont connues. Pour contrer l'incertitude, il propose de dimensionner un stock de sécurité pour chaque composant, calculé comme le fractile de la loi de la demande sur le délai d'obtention, pour une probabilité de rupture prédéterminée. L'espérance mathématique et la variance de la demande en composant sont obtenues par simple sommation des espérances et variances des demandes des produits finis qui les utilisent. Ce résultat, lié à une hypothèse d'indépendance des demandes, ne tient pas s'il s'agit d'un composant commun à plusieurs modules alternatifs d'un même ensemble sans être systématiquement monté sur tous les modules alternatifs de cet ensemble.

Dans un autre article et en se basant sur les mêmes principes de modélisation, Büchel (1983) s'intéresse à la planification des besoins en composants optionnels. Pour le calcul des besoins majorés en composants optionnels assurant un certain niveau de service, il démontre sur un cas d'application que l'utilisation d'un pourcentage d'utilisation aléatoire, résultat du rapport entre deux variables aléatoires que sont la demande en produit fini et la demande en composant optionnel, donne de meilleurs résultats, du point de vue du niveau de service, qu'une couverture proportionnelle à la demande moyenne. De nos jours, la facilité d'application de la simulation de Monte-Carlo rend ce type d'approche facile à implémenter, encore qu'il soit plus simple et sans doute plus efficace de travailler directement sur une demande combinant l'aléa de niveau de production avec un aléa de taux d'utilisation.

En se basant sur un cas d'application, De Bodt et al. (1982) évaluent l'efficacité des méthodes de lotissement associées à différents niveaux de stocks de sécurité dans le cadre d'une planification MRP avec demande incertaine. Le dimensionnement des stocks de sécurité et leur localisation résultent d'une simple comparaison entre plusieurs scénarios de localisation et de niveau de stock de sécurité. Aucune méthode de dimensionnement des stocks de sécurité n'est présentée dans cet article.

Winjgaard et Wortmann (1985) s'interrogent sur les formes de sécurisation pouvant être mobilisées afin de minimiser l'effet de l'incertitude dans la planification MRP. Ils présentent les principes et avantages d'utilisation du stock de sécurité, du délai de sécurité et de la

majoration des quantités du PDP. Dans ce même article, une méthode de dimensionnement des stocks de sécurité, tenant compte de l'erreur de prévision, est proposée pour une configuration en série, convergente puis divergente de la CL. Le modèle proposé considère le cas de composants liés au produit fini par un coefficient de nomenclature égale à 1 et exclut la prise en compte des effets combinés des coefficients de monte et des phénomènes de commonalité¹.

Dans le cas d'une production sur stock d'un seul produit fini, Carlson et Yano (1986) proposent une heuristique permettant de fixer le niveau de stocks de sécurité en régime stationnaire afin de minimiser le coût de stockage et de commande étant donné un taux de service préalablement fixé. Le rôle du stock de sécurité est ici de limiter le nombre de commandes exceptionnelles pouvant intervenir dans le cadre d'une politique de lotissement basée sur l'algorithme de *Wagner Whitin* (conduisant donc à une optimisation locale de l'approvisionnement de chaque composant, sans tenir compte des interdépendances induites par les mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais). Le coût des commandes exceptionnelles est considéré comme équivalent à celui d'une commande « normale ». Cette hypothèse se justifie uniquement lorsqu'une commande exceptionnelle intervient à une période compatible avec les délais d'obtention. Une commande exceptionnelle qui interviendrait en dehors de ce cas, lorsque cela est possible, est a fortiori génératrice de surcoûts² non pris en compte dans la modélisation.

Lagodimos et Anderson (1993) ont examiné la question de la localisation des stocks de sécurité dans une planification MRP de produits standardisés. Leur objectif est de maximiser le niveau de service en répartissant sur les différents niveaux de la nomenclature une valeur donnée de stock de sécurité en utilisant une approche analytique. On considère ici que le niveau de service n'est pas une variable de décision et que les coûts de possession sont identiques à chaque niveau de la nomenclature ; cette hypothèse est forte dans la mesure où, *a priori*, la valeur d'un composant, décroît avec son niveau de nomenclature. La conclusion qui est apportée va dans le sens d'un placement du stock de sécurité au niveau des produits finis dans le cas d'une structure en série de la CL. Les auteurs relativisent la généralisation de leurs résultats en rappelant les limitations imposées par les hypothèses de modélisation.

¹ Inclusion dans des produits finis techniquement différents de composants élémentaires communs. Cette notion est au cœur des premières justifications de la mise en œuvre de la MRP.

² On peut citer par exemple la mobilisation de moyens de transport rapides pour réduire conjoncturellement le délai d'obtention.

Sous l'hypothèse d'une demande normalement distribuée en régime stationnaire, Inderfurth et Minner (1998) s'intéressent à la double problématique du dimensionnement et de la localisation des stocks de sécurité en composants. Le but étant de satisfaire un niveau de service donné à chaque échelon de la CL tout en minimisant le coût global de possession, ils proposent un modèle d'optimisation avec, comme fonction-objectif, la minimisation du coût de possession et, comme contrainte, la garantie d'un taux de service assurant le découplage à un ou plusieurs niveaux de la CL compte tenu des délais d'obtention. Les délais de couverture associés à chacun des maillons de la chaîne constituent les variables de décision du modèle. La demande à chaque niveau découle de la demande finale pouvant porter sur un ou plusieurs produits finis différents ; dans ce dernier cas, des corrélations entre demandes sont introduites pour modéliser la demande sur des composants rentrant dans la composition de plusieurs produits finis. Dans le cas d'une production faisant appel à des composants ou modules alternatifs, la corrélation ne peut intervenir qu'entre des composants appartenant à des ensembles de composants alternatifs distincts¹. La demande sur un composant sera le résultat d'une somme de variables aléatoires binomiales pondérées par des coefficients de monte.

Sur la base du taux de service et du coût de possession, Zhao et al. (2001) comparent la performance de trois méthodes de dimensionnement du stock de sécurité en production pour stock. Compte tenu des résultats obtenus par Carlson et Yano (1986), il est décidé de placer le stock de sécurité au niveau du produit fini. Pour chacune des trois méthodes, un délai de couverture différent est utilisé pour le calcul du stock de sécurité. Aucune justification n'est donnée pour argumenter le choix des délais de couverture.

Dans un article plus récent, Persona et al. (2007) proposent une méthode analytique pour dimensionner des stocks de sécurité en composants et modules dans le cas d'une production ou d'un assemblage à la commande. Dans leur modélisation, ils considèrent que les délais d'approvisionnement sont certains, que les demandes en composants alternatifs sont corrélées au sein d'une même famille de composants alternatifs exclusifs entre eux et que la demande est en régime stationnaire ; le taux de service cible est le résultat d'un compromis entre coûts de rupture et coûts de possession. La notion de corrélation utilisée dans cet article fait référence au lien statistique qui existe entre les demandes portant sur des modules alternatifs d'un même ensemble, or cette relation est le résultat d'une contrainte liée à la distribution

¹ Cette corrélation n'a d'incidence, au niveau des approvisionnements, que dans le cas de composants de jonction entre deux composants alternatifs appartenant à deux ensembles différents de composants alternatifs, ces composants de jonction n'étant pas toujours les mêmes.

Multinomiale et non à une corrélation entre variables aléatoires. Il existe des corrélations entre composants alternatifs appartenant à des ensembles différents mais cette corrélation n'a d'incidence que dans le cas où un composant est lié à deux modules alternatifs appartenant chacun à une nomenclature de planification distincte ; on parlera alors de composants de jonction.

Lamouri et Thomas (2000) évoquent la possibilité d'utiliser les nomenclatures de planification pour la sécurisation des approvisionnements en s'intéressant aux conditions d'utilisation de ce mode de pilotage de flux sans pour autant s'attarder sur les modalités de sa mise en œuvre pratique.

D'autres pistes de protection contre l'incertitude en environnement MRP, comme celles consistant à majorer les quantités du PDP¹ ou à allonger artificiellement les délais d'obtention, ont été explorées dans les articles de Winjgaard et Wortmann (1985), de Guerrero et al. (1986), de Buzacott et Shanthikumar (1994), de Molinder (1997) et de Chang (1985). Buzacott et Shanthikumar (1994) s'intéressent à la possibilité d'utiliser, comme moyen de protection contre l'incertitude, les délais de sécurité. Ils considèrent qu'un arbitrage doit être fait entre stocks de sécurité et délais de sécurité en fonction de la fiabilité des prévisions, des capacités de production, du coût de possession et du coût de rupture. Ils considèrent, dans leur modélisation, un seul échelon fonctionnant en mode MRP en environnement incertain. La conclusion apportée par cette étude est que les stocks de sécurité permettent d'avoir une meilleure performance en coût total en cas de fortes incertitudes sur la demande. Le délai de sécurité a vocation à anticiper une demande future connue avec certitude et conduit nécessairement à un accroissement du stock d'encours dont la grossièreté dépend du découpage temporel retenu². Dans une étude similaire, Molinder (1997) propose des règles d'aide à la décision quant au choix à faire entre stock de sécurité et délai de sécurité. Les paramètres de décision retenus concernent les degrés d'incertitude de la demande et des délais ainsi que le ratio entre coût de rupture et coût de stockage. Ses conclusions sont quelque peu différentes de celles apportées par Buzacott et Shanthikumar (1994) dans le sens où il préconise l'utilisation de délais de sécurité en cas de fortes incertitudes à la fois sur la demande et sur les délais. Le coût associé à un délai de sécurité

¹ Cette technique fait accroître mécaniquement les encours, sauf si cet accroissement est à peu près consommé dans la période suivante, ce qui peut être le cas si l'incertitude porte sur la qualité et que cette augmentation couvre, en moyenne, les pièces non-conformes.

² Le délai de sécurité, dans la démarche de base de la MRP, ne peut être qu'un multiple de la période de base. La démarche est d'autant plus réaliste que le découpage temporel est fin.

étant induit par une augmentation d'encours, il s'ensuit que l'opposition entre stock de sécurité et délai de sécurité n'est pas très claire.

Au vu des nombreux travaux réalisés sur le sujet de la gestion de l'incertitude dans le cadre de la planification MRP, des tentatives de synthèse ont été engagées à travers la publication d'articles de revue de littérature qui, pour la plupart, datent des années 2000. Afin de mettre clairement en évidence les domaines non encore explorés par la littérature spécialisée et de bien identifier le positionnement de nos travaux par rapport à ce qui a déjà été fait, il est intéressant de s'attarder quelque peu sur les grilles d'analyses utilisées par ces revues de littérature.

Guide et Srivastava (2000) s'intéressent aux techniques mises en place afin de contrer l'incertitude en planification MRP. La grille d'analyse proposée comporte les sept axes que sont la modélisation, la méthode de dimensionnement des stocks de sécurité, leur localisation, la définition du délai de sécurité, le type d'incertitude pris en compte dans le modèle, la nature de l'horizon de planification, qui peut être glissant ou statique, et enfin l'indicateur de performance retenu. L'examen qui est fait de la littérature dans cet article conduit à la conclusion que plusieurs lacunes existent encore bien que certaines des solutions proposées restent applicables en vertu d'un ensemble d'hypothèses qui parfois sont discutables. Ces auteurs déplorent également l'inexistence de méthodologie et l'absence de règles précises permettant d'établir un compromis entre les différentes alternatives de protection proposées. Une autre catégorisation de la littérature est proposée par Koh et al. (2002) où l'analyse se fait sur trois axes. Dans le premier axe les auteurs distinguent l'aléa interne lié aux processus de l'aléa externe. Le second axe est relatif au point d'occurrence de l'aléa qui peut être en amont ou en aval du processus productif. Enfin, le troisième axe concerne le type de solution préconisé : l'amortissement de l'aléa (à travers, par exemple, la mise en place de stocks de sécurité) ou la réduction de l'aléa (à travers, par exemple, des techniques de majoration des quantités du PDP). Une conclusion intéressante, apportée par cet article, est qu'il y a dans la littérature une faible proportion d'études proposant une prise en charge des interactions et combinaisons pouvant intervenir entre plusieurs sources d'aléa. Plus récemment, Dolgui et Prodron (2007) ont proposé une grille d'analyse d'articles portant sur la gestion de l'aléa dans le cadre d'une planification MRP. Les articles retenus sont classés en trois familles en fonction du type d'aléa pris en compte : demande, délai et la combinaison des deux. Les auteurs présentent succinctement certaines des techniques communément utilisées pour maîtriser les conséquences de l'incertitude, à savoir : l'horizon gelé, les stocks de

sécurité et les délais de sécurité. En plus des manques mis en évidence par cette étude et qui rejoignent ceux identifiés par Guide et Srivastava (2000) et par Koh et al. (2002), l'accent est mis sur le fait qu'il y a très peu d'articles proposant des modèles multi-échelon à planification glissante.

La problématique de la prise en compte du risque dans la partie de CLs traitant l'approvisionnement de composants optionnels ou alternatifs pour des lignes d'assemblage dédiées à la production de masse de produits fortement diversifiés présente des caractéristiques spécifiques non encore prises en compte dans la littérature et que nous allons chercher à exploiter.

2. Modélisation

Le stock de sécurité peut être constitué pour faire face à différents types d'aléas répertoriés précédemment. On privilégiera ici l'aléa sur la demande, supposée connue en probabilité partiellement ou en totalité ; cet aléa est lié aux nomenclatures de planification et non aux productions quotidiennes des lignes d'assemblage qui sont réputées stables. On y ajoutera une seconde source d'aléa, susceptible de se combiner à la première, celle qui résulte des problèmes de qualité.

La MRP et les politiques calendaires de gestion des approvisionnements partagent la caractéristique de passer des commandes d'approvisionnement ou de production avec une même périodicité. Pour la MRP, le passage d'une demande certaine à une demande partiellement ou totalement aléatoire conduit naturellement à s'inspirer des politiques calendaires définies en univers aléatoire. La cohérence décisionnelle des unités de production impliquées repose sur le choix partagé d'une probabilité de rupture de stock négligeable afin de garantir l'absence de propagation de ruptures de stock dont le caractère exceptionnel permet la mobilisation de procédures exceptionnelles de rattrapage. Une optimisation économique du niveau de risque à appliquer est présentée dans le §2.3.

2.1. Principes de la politique de reapprovisionnement calendaire

En régime de croisière, la politique d'approvisionnement calendaire se caractérise par la passation d'une commande à la date t , livrée à la date $t+L$, L étant le délai d'obtention. Ces commandes sont passées à intervalles réguliers, d'amplitude θ , correspondant à la période de

révision calendaire. La quantité commandée q_t est égale à la différence entre un niveau de rechargement R et la position PS_t de stock observée au moment de la passation de la commande. Le niveau de rechargement correspond à un fractile d'une distribution de probabilité de la demande que devra couvrir ce niveau de rechargement. Cette demande de composant est définie sur la période $\theta + L$. Ce fractile est associé à une probabilité de rupture de stock α appelée encore risque de rupture. Ce risque peut résulter de la minimisation de l'espérance mathématique d'un coût périodique en régime de croisière, intégrant l'impact économique de la politique de rechargement périodique retenue sur les ruptures de stock (espérance mathématique de la rupture pondérée par un coût de rupture unitaire, augmentée d'un coût fixe de rupture) et sur les stocks détenus (stock moyen possédé, pondéré par un coût de possession unitaire) (Giard, 2003). La rupture d'approvisionnement d'une ligne de production a un impact économique très fort puisque la cessation de fonctionnement d'un poste se propage à tous les postes de la ligne mais sa valorisation est difficile car elle dépend de la durée de cette rupture et des procédures d'urgence mobilisée (approvisionnement d'urgence). La difficulté d'établissement d'une fonction de coût réaliste et non-contestable est telle qu'il est plus simple de retenir une valeur arbitrairement faible de ce risque, pour rendre la rupture de stock exceptionnelle. Cependant, la fixation d'un niveau de risque optimal devient envisageable pour certains composants lorsque les conditions permettant la mise en place de procédures de dépannage en cas de rupture sont garanties en tout temps. Ce dernier point est traité dans le §2.3.

Le stock de sécurité SS se définit comme la différence entre le niveau de rechargement et la demande moyenne de la distribution de référence utilisée pour déterminer R . En régime stationnaire, si le risque de rupture accepté α est faible, la rupture de stock moyenne par période est négligeable et le stock résiduel moyen avant livraison diffère très peu du stock de sécurité.

Après la passation de commande, la position de stock est nécessairement égale au niveau de rechargement. Avant la passation de commande suivante, au début de la période $t + \theta$, la position de stock, initialement égale à R , a été diminuée de la demande D_t exprimée au cours de la période t , délimitée par les dates t et la date $t + \theta$. Si les demandes non-satisfaites ne sont pas perdues, la commande à passer au début de la période $t + \theta$, en régime de croisière, est nécessairement égale à la demande D_t :

$$q_t = D_{t-\theta} \quad [2]$$

2.2. Adaptation de la MRP pour tenir compte du caractère aléatoire du PDP hors horizon gelé et d'éventuels problèmes de qualité

Nous examinerons la façon d'adapter le calcul de la quantité de composants à lancer en production, tirés par une demande finale ne pouvant être encore entièrement déterminée au moment de la prise de décision, dans un premier temps en l'absence de problèmes de qualité et, dans un second temps, en présence de tels problèmes.

En plus des notations classiques utilisées en MRP, nous utiliserons les notations suivantes pour développer l'approche proposée :

l : ligne d'assemblage.

\mathcal{E}^l : ensemble de modules alternatifs exclusifs entre eux montés en ligne d'assemblage l . Pour la prise en compte de la commonalité d'un composant i (plusieurs modules alternatifs qui utilisent un même composant sur une ligne d'assemblage l), il est nécessaire, dans un premier temps, d'identifier l'ensemble des modules appartenant à \mathcal{E}^l qui utilisent ce composant.

\mathcal{E}_i^l : ensemble de modules alternatifs montés en ligne d'assemblage l utilisant le composant i ($\mathcal{E}_i^l \subset \mathcal{E}^l$). Compte tenu des mécanismes de d'absorption des délais et d'explosion des nomenclatures, un composant i peut être monté sur plusieurs modules de l'ensemble \mathcal{E}_i^l mais à des dates et/ou avec des coefficients de monte différents. La commonalité intervient lorsqu'un composant i est monté sur plusieurs modules alternatifs à la même date et avec le même coefficient de nomenclature.

a_{ik} : nombre d'unités du composant i inclus dans le module alternatif k (si $k \notin \mathcal{E}_i^l$ alors $a_{ik} = 0$).

λ_{ik} : décalage entre la période t du lancement en production d'une unité du composant i et la période $t + \lambda_{ik}$ de réquisition du module k en ligne d'assemblage.

$\mathcal{E}_{i,a}^l$: ensemble de module alternatifs montés en ligne d'assemblage l utilisant le composant i avec le même coefficient de monte a ($\mathcal{E}_{i,a}^l \subset \mathcal{E}_i^l$ avec $\forall k \in \mathcal{E}_{i,a}^l, a_{ik} = a$).

$\mathcal{E}_{i,a,\lambda}^l$: ensemble de module alternatifs montés en ligne d'assemblage l utilisant le composant i avec le même coefficient de monte a avec le même décalage λ ($\mathcal{E}_{i,a,\lambda}^l \subset \mathcal{E}_{i,a}^l$ avec $\forall k \in \mathcal{E}_{i,a,\lambda}^l, a_{ik} = a$ et $\lambda_{ik} = \lambda$). C'est l'ensemble d'analyse homogène qui permet de prendre en charge les phénomènes de commonalité lors des lancements en production.

$PDP_{k,t}^l$: quantité certaine du PDP de la ligne l associée au module k pour la période t

$X_{k,t}^l$: variable aléatoire représentant la quantité non connue du PDP de la ligne l associée au module k pour la période t .

$X_{i,a,\lambda}^l$: variable aléatoire, associée aux modules k qui utilisent le composant i tels que $\lambda_{ik} = \lambda$ et $a_{ik} = a$, représentant la quantité non connue du PDP de la ligne l pour la période $t = \lambda$.

2.2.1. Lancement en production tenant compte d'une demande finale partiellement aléatoire, en l'absence de problème de qualité

La relation [1] lie les lancements en production d'une référence i aux réquisitions certaines de PDPs, parce que rentrant toutes dans les horizons gelés des lignes d'assemblage ($\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik}) \leq H_G^l$). Lorsque certains de ces modules alternatifs k , montés sur une ligne d'assemblage l , sont tels que $\lambda_{ik} \geq H_G^l$, la partie de production du composant i induite par ces réquisitions, inconnues au moment de la prise de décision de lancement en production, doit se faire pour stock. Il convient alors de remplacer la notation $PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l$, appropriée pour une réquisition certaine du module alternatif k pour la période $t + \lambda_{ik}$, par la variable aléatoire $X_{k,t+\lambda_{ik}}^l$. Le besoin brut $BB_{i,t+L_i}$ est défini par la relation [3] et n'est plus égal au besoin net $BN_{i,t+L_i}$, ni à la livraison programmée $q_{i,t+L_i}$ pour le début de la période $t + L_i$, et donc au lancement en production $LP_{i,t}$ au début de la période t .

$$BB_{i,t+L_i} = \sum_l [\sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l + \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda}^l] \quad [3]$$

Dans cette relation $X_{i,a,\lambda}^l \rightarrow \mathcal{S}(N_l, c_{i,a,\lambda}^l)$ avec $c_{i,a,\lambda}^l = \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} c_k$. Lorsque seul le module k de la ligne l utilise le composant i , on a :

$$\sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda}^l = a_{ik} \times X_{k,t+\lambda_{ik}}^l.$$

La généralisation de cette relation est nécessaire pour la suite ; d'une manière générale, si $\lambda_{ik} - h \geq H_G^l$, la réquisition du PDP de la ligne l n'est pas connue pour le module k utilisant le composant i pour la période $t + \lambda_{ik} - h$, ce qui induit la relation [4].

$$BB_{i,t+L_i-h} = \sum_l [\sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^l + \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda-h}^l] \text{ avec } 0 \leq h \leq L_i - 1 \quad [4]$$

Rappelons que le besoin brut BB_{it} du composant i en période t est certain : il correspond au cumul des commandes fermes passées par les centres consommateurs de la référence i , à livrer au début de la période t .

Commençons par analyser le cas d'une production partiellement pour stock. Dans la logique de la MRP, la livraison $q_{i,t+L_i}$ correspond au besoin net $BN_{i,t+L_i}$ de ce composant i pour cette période $t + L_i$, lequel est égal au besoin brut $BB_{i,t+L_i}$ de cette période (défini par la relation [3]), diminué de la position de stock $PS_{i,t+L_i-1}$ à la fin de la période précédente $t + L_i - 1$. Cette position de stock $PS_{i,t+L_i-1}$ dépend de la position de stock $PS_{i,t-1}$ du composant i , utilisée au début de la période t lors du lancement en production ($PS_{i,t-1}$ correspondant au stock SD_{it} physiquement détenu au début de la période t), des besoins bruts et des livraisons attendues des périodes t à $t + L_i - 1$, ce que décrit la relation [5].

$$\begin{aligned} PS_{i,t+L_i-1} &= PS_{i,t-1} + \sum_{h=0}^{h=L_i-1} [q_{i,t+h} - BB_{i,t+h}] \\ &= PS_{i,t-1} + \sum_{h=0}^{h=L_i-1} q_{i,t+h} - BB_{it} - \sum_l \sum_{h=1}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^l \\ &\quad - \sum_l \sum_{h=1}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda-h}^l \end{aligned} \quad [5]$$

En notant $PS'_{i,t+L_i-1}$ la position de stock à la fin de la période $t+L_i-1$ sur les seules données certaines on obtient :

$$PS'_{i,t+L_i-1} = PS_{i,t-1} + \sum_{h=0}^{L_i-1} q_{i,t+h} - BB_{it} - \sum_l \sum_{h=1}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^l \quad [6]$$

Le besoin net $BN_{i,t+L_i} = BB_{i,t+L_i} - PS'_{i,t+L_i-1}$ devient alors :

$$BN_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l - PS'_{i,t+L_i-1} + \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda-h}^l$$

La partie aléatoire

$$Y_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda-h}^l$$

de cette expression du besoin net est couverte par une quantité $q'_{i,t+L_i}$ telle que $q'_{i,t+L_i} + PS'_{i,t+L_i-1}$ est égale à un niveau de recomplètement $R_{i,t+L_i}$ défini par $P(Y_{i,t+L_i} > R_{i,t+L_i}) = \alpha_i$. α_i correspondant à un risque de rupture, fixé généralement à une valeur très faible, associé au composant i . On en déduit que :

$$LP_{it} = q_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l + R_{i,t+L_i} - PS'_{i,t+L_i-1}$$

$$\text{avec } Y_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda-h}^l \quad \text{et}$$

$$P(Y_{i,t+L_i} > R_{i,t+L_i}) = \alpha \quad [7]$$

La production entièrement pour stock peut être analysée comme un cas particulier des relations [6] et [7] dans lequel $\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik}) \leq H_G^l + L_i - 1$ pour que tous les besoins bruts de $t+1$ à $t+L_i$ soient aléatoires, ce qui conduit à éliminer la présence de $\sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l$ dans la relation [7] et $\sum_l \sum_{h=1}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^l$ dans la relation [6] qui se simplifie pour donner la relation [8] caractérisant une production entièrement pour stock.

$$LP_{it} = q_{i,t+L_i} = BB_{it} + \left[R_{i,t+L_i} - PS_{i,t-1} - \sum_{h=0}^{h=L_i-1} q_{i,t+h} \right]$$

avec $\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik}) \leq H_G^l + L_i - 1$ [8]

En régime de croisière, caractérisé par une stabilité du niveau de production et des composantes de la nomenclature de planification $\bar{c}_{\mathcal{E}^l}$, on a $R_{it} = R_j, \forall t$; des relations plus simples peuvent être établies.

- Dans le cas d'une production partiellement pour stock, en régime de croisière, on commence par exprimer R_i à partir des relations [6] et [7], dans lesquelles on remplace $PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^l$ par $PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^{l,t}$, pour marquer le fait que ces réquisitions pour la ligne d'assemblage l sont connues au début de la période t , et $\sum_{h=0}^{h=L_i-1} q_{i,t+h}$ par $\sum_{h=1}^{h=L_i} LP_{i,t-h}$:

$$R_i = PS_{i,t-1} + \sum_{h=0}^{h=L_i} LP_{i,t-h} - BB_{i,t} - \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^{l,t}$$

On adapte ensuite la relation [7] pour définir $LP_{i,t+1}$, en tenant compte du fait que

$$PS_{it} = PS_{i,t-1} + q_{it} - BB_{it} = PS_{i,t-1} + LP_{i,t-L_i} - BB_{it} :$$

$$LP_{i,t+1} = \sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^{l,t+1} + \left[PS_{i,t-1} + \sum_{h=0}^{h=L_i} LP_{i,t-h} - BB_{it} \right. \\ \left. - \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^{l,t} - \left\{ PS_{i,t-1} + LP_{i,t-L_i} - BB_{it} \right\} \right. \\ \left. + \sum_{h=0}^{h=L_i-1} LP_{i,t-h} - BB_{i,t+1} - \sum_l \sum_{h=1}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^{l,t+1} \right]$$

Après simplification et en passant de $t+1$ à t , on obtient la relation [9] qui indique le lancement en production au début de la période t correspondant au besoin brut de cette période, augmenté de la variation, entre la période courante et la période précédente, des besoins bruts certains des L_i périodes suivant celle du lancement:

$$LP_{it} = BB_{it} + \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} |\lambda_{ik} < H_G^l + h| a_{ik} \times \left[PDP_{k,t+\lambda_{ik}-h}^{l,t} - PDP_{k,t-1+\lambda_{ik}-h}^{l,t-1} \right] \quad [9]$$

- Dans le cas d'une production totalement pour stock, en régime de croisière, on adapte la relation [8] pour définir $LP_{i,t+1}$, en remarquant, comme précédemment, que $\sum_{h=0}^{h=L_i-1} q_{i,t+h} = \sum_{h=1}^{h=L_i} LP_{i,t-h}$ et que $PS_{it} = PS_{i,t-1} + LP_{i,t-L_i} - BB_{it}$, et en retirant R_i de la

$$\text{relation [8] on obtient : } LP_{i,t+1} = BB_{i,t+1} + \left[PS_{i,t-1} + \sum_{h=0}^{L_i} LP_{i,t-h} - BB_{it} \right] - \left[PS_{i,t-1} + LP_{i,t-L_i} - BB_{it} \right] - \sum_{h=0}^{L_i-1} LP_{i,t-h}$$

Après simplification et en passant de $t+1$ à t , on obtient la relation [10], indiquant qu'il convient de lancer en production au début de la période t une quantité égale au besoin brut de cette période. Ce résultat analytique n'a rien d'étonnant puisque la position de stock passe de R_i , avant satisfaction de la demande, à $R_i - BB_{it}$ après expédition et que le lancement en production a pour objet de passer cette position de stock au niveau de recombplètement. On peut ajouter que la relation [9] inclut la relation [10], puisqu'en cas de production entièrement pour stock, aucune réquisition du PDP n'est connue.

$$LP_{it} = BB_{it} \quad [10]$$

Pour terminer, ajoutons que le changement de régime de croisière à la période $t + \text{Max}_l(\text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l}(\lambda_{ik}))$ modifie la valeur du niveau de recombplètement du composant i .

Sachant que les réquisitions inconnues du PDP couvrent $\text{Max}_l(\text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l}(\lambda_{ik})) - \text{Min}_l(H_G^l)$ périodes, le nouveau régime de croisière ne prendra complètement effet qu'à la période $t + \text{Max}_l(\text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l}(\lambda_{ik})) - \text{Min}_l(H_G^l) - 1$. Les relations [9] et [10] restent utilisables à condition d'ajouter à la quantité lancée en production, la variation du niveau de recombplètement par rapport à la période précédente.

2.2.2. Lancement en production tenant compte d'une demande finale partiellement aléatoire, en présence de problèmes de qualité.

Dans l'article de Camisulis et Giard (2010), il est montré que si le besoin brut $BB_{i,t+L_i}$, à couvrir par le lancement en production de la référence i au début de la période t , peut être produit à la commande ($\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l}(\lambda_{ik}) \leq H_G^l$), il est possible de se protéger contre une rupture de stock liée à la possibilité que chaque composant livré ait la probabilité π_i de ne pas être conforme, par l'utilisation d'un stock de sécurité cible – ou stock-cible¹ – $SC_{i,t+L_i}$, ce

¹ L'appellation stock-cible est préférée à celle de stock de sécurité défini classiquement comme la différence entre un niveau de recombplètement et une demande moyenne, ce qui n'est pas le cas ici.

contrôle de qualité étant effectué avant expédition¹. $SC_{i,t+L_i}$ se définit comme le fractile au risque α_i , d'une variable aléatoire $Z_{i,t+L_i}$ suivant la loi Binomiale Négative $\mathcal{BN}(BB_{i,t+L_i}, \pi_i)$. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que les productions de tous les composants qui incluent le composant i ne connaissent pas de problème de qualité, ce qui est une condition pour que $BB_{i,t+L_i}$ soit directement lié aux réquisitions du PDP.

$$Z_{i,t+L_i} \rightarrow \mathcal{BN}(\sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} \lambda_{ik} < H_G^l a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l, \pi_i) \quad \text{tel que } P(Z_{i,t+L_i} > SC_{i,t+L_i}) = \alpha \quad [11]$$

C'est la variation de ce stock-cible ($SC_{i,t+L_i} - SC_{i,t+L_i-1}$ si $L_i > 1$) qu'il convient d'ajouter au besoin brut $BB_{i,t+L_i}$ pour calculer la quantité à livrer $q_{i,t+L_i}$; c'est la différence $SC_{i,t+1} - PS_{i,t-1}$ qu'il faut utiliser si $L_i = 1$. Les relations [12], ou [13] pour le régime de croisière, sont alors à utiliser.

$$LP_{it} = q_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} \lambda_{ik} < H_G^l a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l + SC_{i,t+L_i} - SC_{i,t+L_i-1}, \text{ si } L_i > 1 \quad [12]$$

$$LP_{it} = q_{i,t+1} = \sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} \lambda_{ik} < H_G^l a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l + SC_{i,t+1} - PS_{i,t-1}, \text{ si } L_i = 1 \quad [13]$$

L'utilisation de ces relations implique un calcul du stock-cible à chaque prise de décision. Si la probabilité de non-conformité est faible, une valeur de stock-cible sera valide pour une plage de valeurs relativement large de besoins bruts, ce qui permet un appel aisé à une table évitant tout calcul.

Examinons maintenant le cas d'une production partiellement pour stock. Comme il ne peut y avoir qu'un seul stock de sécurité, il faut mutualiser le risque par une prise en compte simultanée de la variabilité de la demande et de la variabilité de la qualité, ce qui conduit à ne pas séparer l'origine des ruptures de stock dans la définition du risque-cible utilisé pour déterminer le fractile correspondant à R_i . Dans ces conditions, le nombre d'événements à retenir, comme premier argument de la loi Binomiale Négative, est la somme de la demande

¹ Ici, le stock-cible est alors détenu par le fournisseur qui garantit la qualité au client. Si le contrôle de qualité se fait chez le client et non chez le fournisseur, ce stock-cible est à détenir par le client, ce qui conduit à un cumul des stocks-cibles détenus par les clients de la référence i , supérieur au stock-cible détenu chez le fournisseur, en raison d'une non-mutualisation du risque.

certaine pour les périodes t à $t+L_i$ et de $Y_{i,t+L_i}$. Dans ces conditions, le niveau de recomplètement est défini par la relation [14] :

$$R_{i,t+L_i} \text{ tel que } P(W_{i,t+L_i} > R_{i,t+L_i}) = \alpha \text{ avec } W_{i,t+L_i} = Y_{i,t+L_i} + Z_{i,t+L_i},$$

$$Z_{i,t+L_i} \rightarrow \mathcal{BN}(Y_{i,t+L_i} + \sum_l \sum_{k \in \mathcal{E}_i^l} \lambda_{ik} < H_G^l a_{ik} \times PDP_{k,t+\lambda_{ik}}^l, \pi_i) \text{ et}$$

$$Y_{i,t+L_i} = \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a,t+\lambda-h}^l \quad [14]$$

Cette solution, analytiquement correcte, conduit à recalculer $R_{i,t+L_i}$ à chaque prise de décision. Pour éviter cela, il est plus simple, en régime de croisière, de considérer que Z_i est une réalisation d'une variable aléatoire dans laquelle toutes les réquisitions du PDP intervenant dans le calcul du besoin brut à satisfaire sont aléatoires, ce qui revient à utiliser la relation [15], qui est un peu moins performante que la précédente car elle n'exploite pas au mieux toute l'information disponible lors de la prise de décision.

$$R_i \text{ tel que } P(W_i > R_i) = \alpha \text{ avec } W_i = Y_i + Z_i, Z_i \rightarrow \mathcal{BN}(Y_i + Y_i', \pi_i),$$

$$Y_i = \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{H_G^l + h \leq \lambda \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (\lambda_{ik})} X_{i,a}^l \quad \text{et}$$

$$Y_i' = \sum_l \sum_{h=0}^{L_i-1} \sum_{a \leq \text{Max}_{k \in \mathcal{E}_i^l} (a_{ik})} a \times \sum_{\lambda < H_G^l + h} X_{i,a}^l \quad [15]$$

La validité de cette approximation tient au fait que si π_i est faible, l'intervalle de confiance à 95% de $Z_{i,t+L_i}$ est restreint et possède un large recouvrement en retenant des bornes réalistes de $Y_i + Y_i'$.

La généralisation de la démarche de prise en compte des problèmes de qualité dans la production des composants j de niveau $n+1$ utilisés par le composant i de niveau n est, au niveau des principes, assez simple. Elle est un peu compliquée à mettre en œuvre en pratique car elle ne conduit pas à des relations analytiques aussi simples que celles trouvées ci-dessus. Il faut poursuivre le calcul des lancements $LP_{it'}$ pour les périodes $t' > t$ en utilisant la même démarche que pour le calcul de LP_{it} , en distinguant bien la partie certaine, de la partie aléatoire. Une fois ce travail effectué, il faut calculer les lancements des composants j de niveau $n+1$ en adaptant la démarche ayant abouti aux relations [14] et [15]. Une solution

alternative, plus facile à mettre en œuvre, consiste à ajouter aux besoins bruts, le nombre moyen de composants défectueux et à utiliser les relations proposées dans ce paragraphe.

2.3. Optimisation économique du risque α

Pour la fixation du paramètre α_i , qui représente le risque de rupture associé à un composant i , deux approches sont envisageables selon les conditions opérationnelles de mise en pratique de la version revisitée de la MRP.

2.3.1. Possibilité d'avoir recours à des procédures d'urgence

Lorsqu'il est possible de recourir à des procédures d'urgence (transport rapide et augmentation ponctuelle des capacités de production du fournisseur...) pour éviter une rupture d'approvisionnement, d'un module alternatif (ou optionnel) ou d'un composant, conduisant à un arrêt de chaîne d'assemblage, la gestion d'approvisionnements de l'un quelconque de ces modules ou composants est indépendante de celle des autres. La détermination des règles d'approvisionnement d'un module ou d'un composant, conduisant à celle de son risque de rupture α_i , est la solution d'un problème indépendant d'arbitrage économique entre l'espérance mathématique d'un coût de stockage des unités excédentaires lors d'une livraison et celle d'un coût de rupture correspondant au coût fixe du transport urgent (éventuellement nul), augmenté, le cas échéant, de l'espérance du surcoût variable de fabrication et de transport des unités manquantes.

Dans ce premier cas de figure, nous faisons l'hypothèse qu'une rupture de stock, à n'importe quel niveau de la chaîne logistique, se traduit par le déclenchement d'une procédure d'urgence qui permet d'éviter un arrêt de la production. Une procédure d'urgence est généralement associée à la mobilisation de transports rapides permettant de raccourcir ponctuellement le délai d'obtention et d'assurer la non-propagation de la rupture de stock le long de la partie aval de la chaîne logistique. La condition pour qu'un tel fonctionnement soit possible est que le fournisseur soit capable de mobiliser ponctuellement des ressources supplémentaires pour produire les composants manquants et qu'il soit possible d'utiliser un transport d'urgence.

Si les conditions de mobilisation des procédures d'urgence sont réunies, le coût de rupture, pour un composant quelconque, est égal à son coût de dépannage. Dans ces conditions, le choix de α_i peut se faire indépendamment pour chaque composant par

optimisation économique du coût gestion, somme des espérances d'un coût de possession et d'un coût de rupture. Selon la structure du coût de rupture, il est plus ou moins facile de trouver la valeur optimale de α_i .

Considérons le composant i dont la partie aléatoire de la demande, définie sur la période de référence utilisée pour calculer le niveau de reapprovisionnement, est modélisée par la variable aléatoire discrète Y_i . Pour un niveau de reapprovisionnement R_i , le risque de rupture est $\alpha_i = P(Y_i \geq R_i)$ et le coût de gestion de l'approvisionnement du composant i , fonction du niveau de reapprovisionnement R_i , s'écrit comme suit : $CG(R_i) = CP(R_i) + CR(R_i)$ où :

- $CP(R_i)$ est l'espérance mathématique du coût de possession du stock résiduel à la livraison, fonction du niveau de reapprovisionnement R_i , défini comme

$$CP(R_i) = p_i \times \sum_{y_i=R_i+1}^{+\infty} (R_i - y_i) \times P(Y_i = y_i), \text{ avec } p_i \text{ le coût de possession unitaire (celui-ci}$$

dépend du découpage temporel retenu, du taux de possession annuel de l'entreprise et du coût unitaire du composant i).

- $CR(R_i)$ est l'espérance mathématique du coût de rupture associé au niveau de reapprovisionnement R_i , lequel est fonction du niveau de reapprovisionnement R_i , avec

$$CR(R_i) = r_f \times P(Y_i \geq R_i + 1) + r_{v_i} \times \sum_{y_i=R_i+1}^{+\infty} (y_i - R_i) \times P(Y_i = y_i)$$

- o La première partie de ce coût ($r_f \times P(Y_i \geq R_i + 1)$) est l'espérance mathématique de dépense d'une charge fixe r_{f_i} , correspond à un coût fixe de transport exceptionnel, augmenté éventuellement d'un coût de lancement exceptionnel des unités manquantes par le fournisseur ; il est assimilable à un coût de commande.

- o La seconde partie de ce coût ($r_{v_i} \times \sum_{y_i=R_i+1}^{+\infty} (y_i - R_i) \times P(Y_i = y_i)$) correspond à

l'espérance mathématique du surcoût variable direct lié à la rupture de stock, dans

lequel $\sum_{y_i=R_i+1}^{+\infty} (y_i - R_i) \times P(Y_i = y_i)$ est l'espérance mathématique de la rupture de

stock. r_{v_i} correspond à la somme de l'augmentation (éventuellement nulle) du

coût unitaire de production des unités manquantes par le fournisseur et du coût

variable direct de transport (éventuellement nul) s'ajoutant au coût fixe de transport exceptionnel (r_{v_i} et r_{f_i} ne pouvant être simultanément nul).

Nous cherchons à déterminer le risque α_i^* , auquel est associé le niveau de recombplètement R_i^* , qui minimise le coût de gestion. Dans le cas d'une loi de demande discret, les deux fonctions de coût partiel étant monotone décroissantes, R_i^* satisfait le système d'inéquations¹ :

$$CG(R_i^*) - CG(R_i^* + 1) < 0$$

$$CG(R_i^*) - CG(R_i^* - 1) < 0$$

La détermination de R_i^* , et donc de α_i^* , passe par l'étude de la fonction $CG(R_i) - CG(R_i + 1)$. Selon les valeurs de r_{v_i} et r_{f_i} , l'étude de la fonction $CG(R_i) - CG(R_i + 1)$ est plus ou moins facile à réaliser. Après développement et remplacement de $CP(R_i)$ et de $CR(R_i)$ par leurs expressions respectives on obtient : $CG(R_i) - CG(R_i + 1) = r_{f_i} \times P(Y_i = R_i + 1) - p_i + (r_{v_i} + p_i) \times P(Y_i \geq R_i + 1)$. Nous distinguons trois cas selon les valeurs prises par r_{v_i} et r_{f_i} .

2.3.1.1. Nullité du coût fixe d'un approvisionnement en urgence ($r_{f_i} = 0$)

Dans ce cas on obtient : $CG(R_i) - CG(R_i + 1) = -p_i + (r_{v_i} + p_i) \times P(Y_i \geq R_i + 1)$. Dans ces conditions, on retrouve la formulation classique du problème du *Newsvendor* où :

$$P(Y_i \geq R_i + 1) < \frac{p_i}{r_{v_i} + p_i} < P(Y_i \geq R_i) , \text{ ce qui conduit dans le cas continu à : } \alpha_i^* = \frac{p_i}{r_i + p_i} .$$

¹ Dans le cas continu, R_i^* annule $\frac{d(CG(R_i))}{dR_i}$ qui remplace l'expression $CG(R_i) - CG(R_i + 1)$ dans le cas discret.

2.3.1.2. Nullité du coût variable direct des unités approvisionnées en urgence ($r_{v_i} = 0$)

Dans ce cas on obtient : $CG(R_i) - CG(R_i + 1) = r_{f_i} \times P(Y_i = R_i + 1) - p_i \times P(Y_i < R_i + 1)$.

Pour R_i^* , on a : $\frac{P(Y_i = R_i^* + 1)}{P(Y_i < R_i^*)} < \frac{p_i}{r_{f_i}} < \frac{P(Y_i = R_i^*)}{P(Y_i < R_i^* - 1)}$ ce qui conduit, dans le cas continu, à

écrire $\frac{f(R_i^*)}{P(Y_i < R_i^*)} = \frac{p_i}{r_{f_i}}$. Le membre gauche de cette relation correspond à une fonction de

hasard où f est la densité de probabilité de la demande sur la période de référence du niveau de recomplètement.

Que l'on soit dans un cas discret ou le cas continu d'une loi Normale, la détermination numérique de la solution optimale et la création d'abaque liant α_i^* au rapport $\frac{p_i}{r_{f_i}}$ (qui, à une constante multiplicative près est égale au rapport du coût d'acquisition du module alternatif, par le coût fixe de l'approvisionnement en urgence), est relativement simple.

Dans le cas où la demande Y_i est une somme pondérée de lois binomiales, la solution passe par la simulation pour obtenir la distribution de probabilité de la demande (ce qui suppose un nombre élevé de simulations pour avoir une précision suffisante). Lorsque l'approximation normale de Y_i peut être effectuée, la résolution est nettement plus simple car il est possible de construire un abaque pour la loi normale centrée réduite.

En posant $Y_i \rightarrow \mathcal{N}(\mu_{Y_i}, \sigma_{Y_i})$ et $T = \frac{Y_i - \mu_{Y_i}}{\sigma_{Y_i}}$ (on note t est la réalisation de la variable

aléatoire normale centrée réduite T), la relation $\frac{f(R_i^*)}{P(Y_i < R_i^*)} = \frac{p_i}{r_{f_i}}$ peut être remplacée par la

relation suivant : $\frac{f(t_i^*)}{\Phi(t_i^*)} = \frac{p_i}{r_{f_i}} \times \sigma_{Y_i}$ où $t_i^* = \frac{R_i^* - \mu_{Y_i}}{\sigma_{Y_i}}$ et Φ la fonction de répartition de la loi

normale centrée réduite. La fonction $g(t) = \frac{f(t)}{\Phi(t)}$ peut être tabulée pour construire l'abaque

présenté en Annexe 3 qui donne le risque α_i^* pour des valeurs de $\frac{p_i}{r_{f_i}} \times \sigma_{Y_i}$ (la lecture des

valeurs de $\frac{p_i}{r_{f_i}} \times \sigma_{Y_i}$ se fait en sommant les deux premières décimale, en première colonne du tableau, et la troisième décimale en première ligne ; à l'intersection de la ligne et de la colonne qui donnent la valeur de $\frac{p_i}{r_{f_i}} \times \sigma_{Y_i}$ se trouve la valeur de α_i^*).

2.3.1.3. Coût fixe et coût variable direct des unités approvisionnées en urgence non nuls ($r_{v_i} \neq 0$ et $r_{f_i} \neq 0$)

Dans ce cas on a $CG(R_i) - CG(R_i + 1) = r_f \times P(Y_i = R_i + 1) - p_i + (r_i + p_i) \times P(Y_i \geq R_i + 1)$. C'est le cas général où le coût de dépannage est une somme d'un coût fixe et d'un coût variable. De même que pour le cas précédent, une approximation de la loi de demande Y_i par une loi normale peut être envisagée pour trouver numériquement la valeur optimale du risque selon la relation suivante : $r_{f_i} \times f(R_i^*) = p_i - (r_{v_i} + p_i) \times P(Y_i > R_i^*)$ équivalente à :

$$\frac{f(t_i^*)}{1 - \Phi(t_i^*)} = \frac{\sigma_{Y_i}}{r_{f_i}} \times \left[p_i \times \left(\frac{\Phi(t_i^*)}{1 - \Phi(t_i^*)} \right) - r_{v_i} \right], \text{ obtenue après centrage et réduction de } Y_i. \text{ Un}$$

faisceau de courbes pour certaines valeurs optimales de α , en fonction des paramètres

$$\frac{\sigma_{Y_i}}{r_{f_i}} \times p_i \text{ et } \frac{\sigma_{Y_i}}{r_{f_i}} \times r_{v_i}, \text{ est proposé en Annexe 4.}$$

2.3.2. Impossibilité d'avoir recours à des procédures d'urgence

Lorsque, pour certains composants ou modules alternatifs, il est impossible d'avoir recours à des mesures de dépannage d'urgence pour éviter un arrêt de chaîne, le raisonnement ne peut être local par le traitement isolé de chaque composant, mais doit avoir comme point de référence un risque d'arrêt acceptable de la chaîne. On ne parle alors pas d'optimisation économique du risque de rupture.

Dans ce cas de figure, le coût de rupture est associé à la fois à la probabilité d'arrêt de chaîne et à la durée de cet arrêt et non aux probabilités de rupture de chaque module alternatif ou composant pris séparément. Dans ces conditions, il est difficile d'envisager une optimisation économique des α_i . Les coûts très élevés qu'engendre un arrêt de chaîne, encouragent une prise de risque minimum se traduisant concrètement par la fixation d'un risque acceptable d'arrêt de chaîne β exprimé en nombre de jours de rupture par an. Compte

tenu du manque à gagner important que génère un arrêt de chaîne, ce nombre de jours doit être extrêmement faible. À partir de cet objectif, il devient possible de fixer des valeurs de α_i permettant de calculer des niveaux de complètement pour les modules et composants utilisés en ligne d'assemblage. Le risque à appliquer pour un composant situé à un niveau quelconque de la nomenclature se calcul par propagation du risque de rupture défini au niveau des composants utilisés en ligne d'assemblage finale. Ce calcul peut s'avérer compliqué à réaliser lorsque la nomenclature produit est complexe et que les fournisseurs sont partagés par plusieurs lignes d'assemblage finales. On préférera, dans ce cas, fixer arbitrairement des valeurs de α_i très faibles qui dans tous les cas doivent être inférieures à β^1 .

Dans le paragraphe suivant, la version revisitée de la MRP sera illustrée numériquement en considérant un risque arbitraire $\alpha = 0,01\%$.

3. Illustration numérique

Illustrons maintenant l'utilisation de ces résultats analytiques en nous appuyant sur un exemple d'une partie de CL divergente comportant deux usines A et B d'assemblage de véhicules (clients finaux) appartenant à la même entité juridique et s'approvisionnant en moteurs auprès d'une même usine mécanique. Cette usine s'approvisionne auprès d'un seul fournisseur de pistons, qui lui-même s'approvisionne en têtes de pistons auprès d'un fournisseur unique. On supposera que cet ensemble fonctionne suivant les principes de la MRP-I, avec passation d'une commande et réception d'une livraison au début de chaque période, le découpage temporel retenu utilisant une période de base de 2 jours.

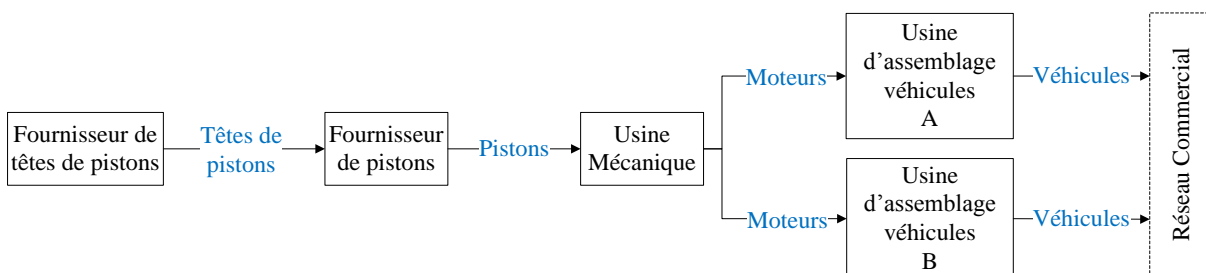


Figure VI- 1: Sous-ensemble d'une CL automobile à quatre échelons

¹ Cette condition n'est pas suffisante car il faut tenir compte du nombre de poste présents en ligne de montage, et du nombre de modules alternatifs montés au niveau de chaque poste.

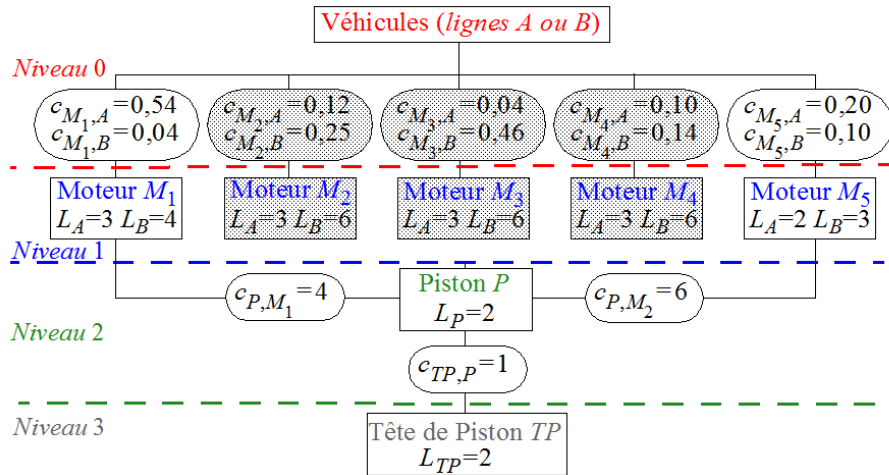


Figure VI- 2 : Nomenclature, coefficient de nomenclature (c) et délais d'obtention (L)

La Figure VI- 2 décrit l'extrait de nomenclature pertinent pour le sous-ensemble étudié, en y ajoutant les délais d'obtention des composants (exprimés en nombre de période de base de 2 jours). Au niveau 0, on retrouve les véhicules fabriqués par deux lignes d'assemblage distantes dédiées à des marchés différents n'ayant pas la même structure de demande. Au niveau 1, on trouve les nomenclatures de planification associées à chacune de ces lignes ; parmi les 5 modules alternatifs montés sur les lignes d'assemblage des unités A et B, on supposera que seuls les moteurs M_1 et M_5 utilisent les pistons auxquels on s'intéresse ici, les têtes de pistons étant spécifiques à chaque type de piston. Par ailleurs, les délais d'obtention des moteurs intègrent un temps de production, d'une période, et un temps de transport entre l'usine mécanique et les usines de montage des véhicules. L'importance de ce temps de transport, classique dans ce type de CL, conduira à isoler cette opération de logistique comme une opération de production dans le mécanisme de la MRP.

Les PDPs des usines A et B sont définis au niveau des modules alternatifs (moteurs). Ces données, ainsi que les positions de stock initiales et livraisons attendues sont fournies dans le Tableau VI- 1.

CHAPITRE VI. PILOTAGE DES FLUX-AMONT PAR L'EXPLOITATION DES INFORMATIONS COMMERCIALES DANS UNE VERSION REVISITÉE DE LA MRP

PDP des moteurs M1 et M5 défini au début de la période 1										
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	PDP(Moteur 1)	993	984	978	1001	979	976	1036	994	994
	PDP(Moteur 5)	97	93	97	112	107	90	86	92	92
B	PDP(Moteur 1)	171	198	183	184	193	188	205	192	192
	PDP(Moteur 5)	117	94	82	105	113	114	100	96	96
TRANSPORT : 2 jours de l'usine d'assemblage moteurs vers l'usine d'assemblage véhicules de A 4 jours de l'usine d'assemblage moteurs vers l'usine d'assemblage véhicules de B										
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Livraison usine A	Livraison (Moteur 1)	993	984	978	1001	979	976	1036	994	994
	Livraison (Moteur 5)	97	93	97	112	107	90	86	92	92
Livraison usine B	Livraison (Moteur 1)	171	198	183	184	193	188	205	192	192
	Livraison (Moteur 5)	117	94	82	105	113	114	100	96	96
Départ vers usine A	Expédition (Moteur 1)	984	978	1001	979	976	1036	994	994	994
	Expédition (Moteur 5)	93	97	112	107	90	86	92	92	92
Départ vers usine B	Expédition (Moteur 1)	183	184	193	188	205	192	192	192	192
	Expédition (Moteur 5)	82	105	113	114	100	96	96	96	96
Moteur 1	L=2		PS(0)=30		Livraison 1=1		Livraison 2 =1			
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BB(M1 à expédier à A)		984	978	1001	979	976	1036	994	994	994
BB(M1 à expédier à B)		183	184	193	188	205	192	192	192	192
Besoins Bruts globaux		1167	1162	1194	1167	1181	1228	1186	1186	1186
Livraisons attendues début période		1190	1200							
Position de stock fin de période	30	53	91	-1103						
Besoins Nets				1103	1167	1181	1228	1186	1186	1186
Lancement		1103	1167	1181	1228	1186	1186	1186	1186	1186
Moteur 5	L=1		PS(0)=15		Livraison 1=190					
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BB(M5 à expédier à A)		93	97	112	107	90	86	92	92	92
BB(M5 à expédier à B)		82	105	113	114	100	96	96	96	96
Besoins Bruts globaux		175	202	225	221	190	182	188	188	188
Livraisons attendues début période		190								
Position de stock fin de période	15	30	-172							
Besoins Nets			172	225	221	190	182	188	188	188
Lancement		172	225	221	190	182	188	188	188	188
Pistons	L=2		PS(0)=20		Livraison 1 =5780		Livraison 2 =5900			
Coefficient de nomenclature			4 pistons pour le moteur 1			6 pistons pour le moteur 5				
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BB venant de M1		4412	4668	4724	4912	4744	4744	4744	4744	4744
BB venant de M5		1032	1350	1326	1140	1092	1128	1128	1128	1128
Besoins Bruts globaux		5444	6018	6050	6052	5836	5872	5872	5872	5872
Livraisons attendues début période		5780	5900							
Position de stock fin de période	20	356	238	-5812						
Besoins Nets				5812	6052	5836	5872	5872	5872	5872
Lancement		5812	6052	5836	5872	5872	5872	5872	5872	5872
Têtes de piston	L=2		PS(0)=480		Livraison 1 = 5870		Livraison 2 = 5790			
Coefficient de nomenclature	1 tête de piston par piston									
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Besoins Bruts		5812	6052	5836	5872	5872	5872	5872	5872	5872
Livraisons attendues début période		5870	5790							
Position de stock fin de période	450	508	246	-5590						
Besoins Nets				5590	5872	5872	5872	5872	5872	5872
Lancement		5590	5872	5872	5872	5872	5872	5872	5872	5872

XXX Pegging des Pistons XXX Pegging des Têtes de Piston

Tableau VI- 1 : Illustration du mode de fonctionnement MRP en univers certain

Sur cet exemple, il est facile de calculer les valeurs des λ_{ik} pour les pistons ainsi que pour les têtes de piston (Cf. Tableau VI- 2).

Composants alternatifs $k \in \mathcal{C}_k^c$	M_{1A}	M_{5A}	M_{1B}	M_{5B}
λ_{ik} , pour $i =$ tête de piston	7	6	8	7
λ_{ik} , pour $i =$ piston	5	4	6	5

Tableau VI- 2 : Valeurs des λ_{ik} pour les pistons et têtes de piston

Dans toutes les illustrations des solutions analytiques proposées, on retiendra, dans la détermination des variables de commande du problème posé (niveau de rechargement ou stock cible), un niveau de risque très faible ($\alpha=0,01\%$). Ce choix, qui se justifie par la gravité des conséquences économiques d'une rupture de stock, a comme intérêt d'assurer une absence de propagation de perturbations d'un échelon à un autre, à partir du moment où des mesures exceptionnelles d'approvisionnement peuvent être mises en place dans les quelques cas de rupture de stock.

3.1. Illustration des relations à utiliser en l'absence de problème de qualité

On examinera le cas de production à la commande puis celui d'une production partiellement sur stock.

3.1.1. Production à la commande en l'absence de problème de qualité

Ce premier cas de figure, correspondant au cas standard de la MRP caractérisé par la condition $\forall l, \text{Max}_{k \in \mathcal{C}_i^l}(\lambda_{ik}) \leq H_G^l$. Pour que cette propriété soit respectée pour tous les composants, on retiendra ici une longueur d'horizon gelé de 9 périodes ($H_G^A = H_G^B = 9$). Le Tableau VI- 1 illustre les calculs des lancements en production des moteurs, pistons et têtes de piston. Pour des raisons de comparaison des différents cas de figure étudiés, les positions de stock des différentes références à la fin de la période $t=0$ ne sont pas nulles, comme cela devrait être le cas en univers certain ; elles le deviennent aux périodes suivantes. On notera également que les livraisons attendues ne sont pas égales aux besoins bruts mais que cette propriété du régime de croisière en univers certain se vérifie mécaniquement lorsque les calculs de la MRP sont effectués au début de la période $t = \text{Max}_i(L_i)$, dans le cadre du mécanisme de la planification glissante.

3.1.2. Production partiellement pour stock en l'absence de problème de qualité

Il s'agit ici d'illustrer l'utilisation des relations [7] et [9]. Pour ce faire, on retiendra maintenant une longueur d'horizon gelé de 7 périodes identique pour les deux lignes unités A et B ($H_G^A = H_G^B = H_G = 7$), pour que la propriété d'une production partiellement pour stock ($\exists k \in \mathcal{E}_i^l \text{ et } \exists k' \in \mathcal{E}_i^{l'} \mid \lambda_{ik} \leq H_G^l \text{ et } \lambda_{ik} > H_G^{l'}$) soit respectée. Les informations du PDP au-delà de la période 7 sont inexploitable (on a retenu des valeurs moyennes dans le Tableau VI- 1). La comparaison des valeurs des λ_{ik} (Cf. Tableau VI- 2) avec H_G montre que la production des pistons se fait entièrement à la commande, et celle des têtes de piston, partiellement à la commande et partiellement pour stock.

Le Tableau VI- 3 explicite l'origine des besoins bruts des têtes de piston des périodes 2 et 3 :

– La partie certaine des besoins bruts de la période 2 est : $4144 + 540 + 600 = 5284$; celle de la période 3 est 516 ; on retrouvera ces informations dans le Tableau VI- 5.

– En application de la relation [7] la distribution de référence Y , utilisée pour définir le niveau de rechargement des têtes de piston est :

$$Y = 4 \times \mathcal{S}(960; 0, 2) + 4 \times \mathcal{S}(1840; 0, 54) + 4 \times \mathcal{S}(960; 0, 2) + 6 \times \mathcal{S}(960; 0, 1)$$

La distribution de probabilité de Y , somme pondérée de lois Binomiales, n'a pas de solution analytique. Elle se détermine numériquement par méthode de Monte-Carlo (Cf. Figure VI- 3) qui conduit au Tableau VI- 4 associant les niveaux de rechargement à quelques valeurs de risque de rupture de stock. Dans la suite (Tableau VI- 5), on utilisera le niveau de rechargement de 6548 associé au risque $\alpha = 0,01\%$, en considérant que l'on se trouve en régime de croisière.

	Composants alternatifs $k \in \mathcal{K}_{ik}$	λ_{ik}	Composantes des besoins bruts	
			certaines	aléatoires
Besoins bruts en $t=2$	M_{1A}	7	$PDP_{M_{1A},7} = 1036 \times 4 = 4144$	--
	M_{5A}	6	$PDP_{M_{5A},6} = 90 \times 6 = 540$	--
	M_{1B}	8	--	$X_{M_{1B},8} \rightarrow 4 \times \mathcal{S}(960; 0, 20)$
	M_{5B}	7	$PDP_{M_{5B},7} = 100 \times 6 = 600$	--
Besoins bruts en $t=3$	M_{1A}	7	--	$X_{M_{1A},8} \rightarrow 4 \times \mathcal{S}(1840; 0, 54)$
	M_{5A}	6	$PDP_{M_{5A},7} = 86 \times 6 = 516$	--
	M_{1B}	8	--	$X_{M_{1B},9} \rightarrow 4 \times \mathcal{S}(960; 0, 20)$
	M_{5B}	7	--	$X_{M_{5B},8} \rightarrow 6 \times \mathcal{S}(960; 0, 10)$

Tableau VI- 3 : Décomposition de la demande de têtes de piston en $t=2$ et $t=3$

Risque de rupture de stock retenu α	1 %	0,1 %	0,01 %	0,001 %
Niveau de reapprovisionnement R associé	6374	6464	6548	6593

Tableau VI- 4 : Niveau de reapprovisionnement des têtes de piston en fonction de α .

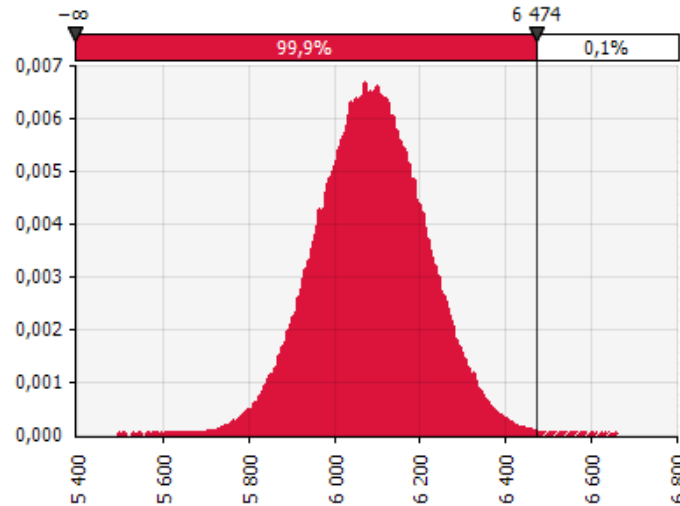


Figure VI- 3 : Distribution de probabilité de Y , demande de référence des têtes de piston en régime de croisière¹

L'utilisation de ce niveau de reapprovisionnement est illustrée dans le Tableau VI- 5 qui reprend, sur ces nouvelles bases, le calcul du lancement des têtes de piston pour $t=1$, les décisions de lancement des pistons et des moteurs restant inchangées avec la valeur retenue pour H_G .

Le besoin net de la période $t=3$ (6050) est couvert par une livraison programmée pour le début de cette période, lancée en production au début de la période $t=1$. En application de la relation [7], cette livraison correspond au besoin brut certain (516) de la période $t=3$, augmenté

¹ Cette distribution est une somme pondérée de distributions Binomiales indépendantes. Les conditions d'approximation de chaque Binomiale par une loi Normale étant réunies, il s'ensuit que la somme pondérée de lois Normales suit une loi Normale, d'où l'allure de cette distribution. Cela étant, la simulation de Monte-Carlo, effectué avec l'add-in classique « @Risk » d'Excel n'utilise aucune approximation.

de la différence entre le niveau de recombplètement R calculé précédemment (6548) et la position de stock certaine (1014) en fin de période $t=2$. Celle-ci est calculée en utilisant la relation récurrente classique de calcul de la position de stock, en partant de la position de stock de la fin de la période $t=0$ (450), en y ajoutant les livraisons attendues (5870+5790) et en y retranchant la partie certaine des besoins bruts de la période 1 (5812) et de la période 2 (4144+540+600=5790).

Têtes de piston	L=2		PS(0)=450	Livraison 1 = 5870			Livraison 2 = 5790			
Coefficient de nomenclature	1 tête de piston par piston									
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Besoins Bruts		5812	6052	5836	5872	5872	5872	5872	5872	5872
Besoins Bruts certains		5812	5284	516						
Niveau de recombplètement R				6548						
Livraisons attendues début période		5870	5790	+	+					
Position de stock certaine fin de période	450	508	1014	-						
Besoins Nets = Livraison Programmée				6050						
Lancement Programmé		6050								

Tableau VI- 5 : Détermination du nombre de têtes de piston lancées en production en $t=1$, en l'absence de problèmes de qualité

Pour illustrer l'utilisation de la relation [9] dans le Tableau VI- 6, on se place maintenant au début de la période $t=2$, dans le cadre d'une planification glissante. Les réquisitions du PDP de la période $t=8$ sont maintenant connues : $PDP_{1A,8}=991$, $PDP_{5A,8}=109$, $PDP_{1A,8}=991$, $PDP_{1B,8}=214$, et $PDP_{5B,8}=84$. Celles des périodes suivantes sont toujours considérées comme inexistantes ou inexploitable. La livraison programmée pour le début de la période $t=3$ (6050) du Tableau VI- 5 devient une livraison attendue dans le Tableau VI- 6. Lors de la décision prise en $t=1$, la partie certaine du besoin brut de la période 2 était de 5284 ; il est maintenant entièrement connu (6140). La partie certaine des besoins bruts des périodes 3 et 4 est $4984+612=5596$. Lors de la décision précédente, la partie certaine des besoins bruts des périodes 2 et 3 était $5284+516=5800$. Avec $BB_2=6140$, l'application de la relation [9] conduit à lancer en production $LP_2=6140+(5596-5800)=5936$; l'application de la relation [7] conduit, bien évidemment, à la même valeur ($612+6548-1224=5936$).

Têtes de piston	L=2	PS(1)=508	Livraison 1 = 5790		Livraison 2 = 6050					
Coefficient de nomenclature	1 tête de piston par piston									
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Besoins Bruts			6140	5752	5836	5872	5872	5872	5872	5872
Besoins Bruts certains			6140	4984	612					
Niveau de reapprovisionnement R					6548					
Livraisons attendues début période			5790	6050						
Position de stock certaine fin de période		508	158	1224						
Besoins Nets = Livraison Programmée					5936	← 6140+[(4984+612)-(5284+516)]				
Lancement Programmé			5936							

Tableau VI- 6 : Détermination du nombre de têtes de pistons lancés en production en $t=2$, en l'absence de problèmes de qualité

3.2. Illustration des relations à utiliser en présence de problème de qualité

On suppose que le contrôle de qualité est effectué avant expédition (en cours de fabrication ou en contrôle final). On reprendra l'exemple numérique du §3.1.2 ($H_G=7$) qui permet d'illustrer le traitement de ce problème de qualité lorsque les besoins bruts sont tous certains (relation [12]), ce qui est le cas des pistons (on supposera qu'il n'existe pas de problème de qualité pour les moteurs) et lorsqu'ils ne le sont pas (relation [14]), ce qui est le cas des têtes de piston. On supposera que le contrôle de qualité conduit à une probabilité $\pi=1\%$ qu'un composant contrôlé soit défectueux.

3.2.1. Détermination du stock-cible pour contrer les problèmes de qualité dans le cas où les besoins bruts sont certains

Nous nous positionnons dans le cas où $H_G=7$ avec une production des pistons qui se fait entièrement à la commande.

En présence de pistons défectueux, il est nécessaire de disposer d'un stock-cible (défini par la relation [12]). Dans le Tableau VI- 1, le besoin brut de pistons pour la période 1 est 5444. Le nombre v de pièces défectueuses, constatées avant mise à disposition au client, est la réalisation d'une variable aléatoire V qui suit la loi Binomiale $\mathcal{B}(5444;0,1\%)$; dans le Tableau VI- 7 on suppose que 7 pistons défectueux ont été trouvés, valeur de cette loi générée aléatoirement ; sur un exemple réel, il s'agirait d'une observation faite avant la prise de décision, ce qui explique l'absence de cette information pour les périodes suivantes. La position de stock (349) à la fin de la période $t=1$ tient compte de ces pièces défectueuses.

Le besoin brut de la période 3 est de 6050. À cette quantité, il faut ajouter le stock-cible SC et retrancher la position de stock à la fin de la période précédente (231). Ce stock-cible correspond au fractile, au risque α , de la distribution de probabilité

$Z_{i,t+L_i} = Z_{Pistons,3} \rightarrow \mathcal{N}(6050;0,1\%)$. Le Tableau VI- 8 donne le stock cible pour quelques valeurs de α . Dans notre exemple, on retiendra un risque de 0,01 %, ce qui donne un stock-cible de 17, ce qui conduit à un besoin net de 5836, couvert exactement par une livraison programmée de cette quantité au début de la période $t=3$ conséquence du lancement de cette quantité en période $t=1$. Dans cette approche exacte, le stock cible doit être actualisé à chaque période de calcul, puisque le besoin brut varie. Il est facile, sous tableur, d'établir une table définissant la valeur du stock-cible pour différentes plages de valeurs de besoin brut et une valeur donnée de taux de non-conformité, ce qu'illustre le Tableau VI- 9. Ce stock-cible de 17, pour $\pi=0,01\%$ est associé à une plage de valeurs de plus de 500 unités.

Pistons	L=2		PS(0)=20		Livraison 1 = 5780		Livraison 2 = 5900			
Coefficient de nomenclature	4 Pistons pour le Moteur 1				6 Pistons pour le Moteur 5					
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Besoins Bruts venant de M1		4412	4668	4724	4912	4744	4744	4744	4744	4744
Besoins Bruts venant de M5		1032	1350	1326	1140	1092	1128	1128	1128	1128
Besoins Bruts globaux		5444	6018	6050	6052	5836	5872	5872	5872	5872
Livraisons attendues début période		5780	5900							
Position de stock fin de période	20	349	231							
Nombre de pièces défectueuses		7	5780+20-7-5444							
Stock Cible				17	6050+17-231					
Besoins Nets = Livraison Programmée				5836	6052	5836	5872	5872	5872	5872
Lancement		5836	6052	5836	5872	5872	5872	5872	5872	5872

Tableau VI- 7 : Détermination du nombre de pistons lancés en production en $t=1$, en cas de problèmes de qualité sur les seuls pistons

Risque α	1 %	0,1 %	0,01 %
Stock-cible SC	12	15	17

Tableau VI- 8 : Stock-cible des pistons en fonction de α , pour un besoin brut de 6050

Stock-cible SC	14	15	16	17	18	19
Plage de valeurs	4098-4619	4620-5156	5157-5506	5507-6269	6270-6843	6844-7428

Tableau VI- 9 : Plage de valeurs de besoins bruts nécessitant le stock-cible SC pour $\pi=0,01\%$

3.2.2. Production partiellement pour stock en présence de problèmes de qualité

On suppose maintenant que la fabrication des pistons s'effectue sans défaut, pour conserver la liaison déterministe des besoins bruts de pistons avec les réquisitions du PDP. En effet, le lancement en production des têtes de piston en $t=1$ dépend du besoin net de pistons en $t=5$ lequel dépend d'une position de stock qui est fonction d'un nombre de pistons défectueux qui sera détecté au début des périodes 2 à 4. La présence de têtes de piston défectueuses conduit à faire appel à un stock-cible défini par la relation [14]. Les besoins bruts certains à prendre en compte pour le calcul de R sont : $5812+5284+516=11612$ (Cf. Tableau VI- 10). La définition de Y reste-identique à celle du §3.1.2. La loi Binomiale

Négative à utiliser est $Z \rightarrow \mathcal{N}(11612+Y;0,1\%)$; la distribution de probabilité de la variable $W=Y+Z$ s'obtient par simulation. Le niveau de rechargement correspondant au fractile associé au risque $\alpha=0,01\%$ est $R=6556$, contre 6548 en l'absence de problème de qualité.

Par rapport au cas de l'absence de problème de qualité (Tableau VI- 5), le Tableau VI-10 prend en compte les 11 têtes de piston défectueuses dans le calcul de la position de stock en $t=1$ ($497=450+5870-5812-11$) et du nouveau niveau de rechargement (6556), ce qui conduit à un lancement de 6069 têtes de piston.

Têtes de piston	L=2	PS(0)=450	Livraison 1 = 5870		Livraison 2 = 5790					
Coefficient de nomenclature	1 tête de piston par piston									
Période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Besoins Bruts		5812	6052	5836	5872	5872	5872	5872	5872	5872
Besoins Bruts certains		5812	5284	516						
Niveau de rechargement R				6556						
Livraisons attendues début période		5870	5790							
Position de stock certaine fin de période	450	497	1003							
Nombre de pièces défectueuses		11								
Besoins Nets				6069	5872	5872	5872	5872	5872	5872
Lancement		6069	5872	5872	5872	5872	5872	5872		

Tableau VI- 10 : Détermination du nombre de têtes de pistons lancés en production en $t=1$, en présence de problèmes de qualité

Deux remarques complémentaires doivent être faites.

L'utilisation de la relation [15] permet d'éviter, en régime de croisière, un nouveau calcul du niveau de rechargement à chaque prise de décision. Cette solution approchée considère que toutes les réquisitions du PDP intervenant dans le calcul du besoin brut à satisfaire sont aléatoires, ce qui revient à les remplacer par la variable Y' .

$$Y' = [4 \times \mathcal{S}(1840;0,54) + 4 \times \mathcal{S}(1840;0,54)] + [4 \times \mathcal{S}(960;0,2)] + [6 \times \mathcal{S}(1840;0,05) + 6 \times \mathcal{S}(1840;0,05) + 6 \times \mathcal{S}(1840;0,05)] + [6 \times \mathcal{S}(960;0,1) + 6 \times \mathcal{S}(960;0,1)]$$

Dans ces conditions, la variable Z suit la loi $\mathcal{N}(Y+Y';0,1\%)$ et le nouveau niveau de rechargement est $R=6545$, contre 6556 dans la solution exacte, d'où un lancement en production de 6058. La quantité commandée dans la solution approchée est minorée de 11 unités par rapport à la solution exacte, ce qui s'explique partiellement par le fait que la valeur de la partie certaine du PDP utilisé dans le calcul du besoin brut des têtes de piston est supérieure à l'espérance mathématique de cette partie lorsqu'elle est considérée comme aléatoire $E(Y')=11528$. Cette minoration accroît le risque associé à cette décision ponctuelle,

sachant que ce risque est minoré lorsque la quantité commandée par cette solution approchée est supérieure à celle de la solution exacte.

Les solutions analytiques utilisées dans ce §3.2 reposent sur l'hypothèse qu'aucun problème de qualité ne se pose dans la fabrication des composants qui incluent le composant auquel on s'intéresse. Une solution approchée consiste à ajouter aux besoins bruts d'un composant, le nombre moyen de composants-parents défectueux. Dans l'exemple ci-dessus, si 0,1% des moteurs et des pistons sont défectueux, les besoins bruts utilisés sont à multiplier par $1,001^2$. La démarche reste la même avec un niveau de recomplètement plus élevé.

Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible de garantir une bonne performance, en termes d'efficacité et d'efficience, de la production de modules alternatifs – et des composants qu'ils utilisent – avec un pilotage de type MRP combinant production à la commande et production pour stock et prenant en compte les aléas de qualité, appliqué à une production de masse de produits fortement diversifiés.

Le degré d'anticipation de la demande n'étant pas identique à un instant donné selon les gammes de produits et les sites de production, mais aussi selon période du cycle de vie des produits ¹, il est judicieux de ne pas utiliser le même horizon gelé pour tous les PDP, ce que permet facilement l'approche proposée. Un autre avantage de cette approche est d'autoriser une certaine autonomie décisionnelle des maillons productifs amont. En effet, ceux-ci doivent seulement s'engager à utiliser les niveaux de recomplètement transmis par l'échelon central, ce qui est générateur d'un coût de possession pour eux. En contrepartie, le coût des ruptures de stock, exceptionnelles *a priori*, ne leur sont pas imputables mais pris en charge selon un accord contractuel à définir. Deux observations doivent être faites sur le respect des hypothèses sous-jacentes dans cette démarche qui en conditionne la pertinence.

L'utilisation de la nomenclature de planification \bar{c}_{el} d'un ensemble de K modules alternatifs suppose sa stabilité ou que les facteurs de sa transformation au cours du temps, induite par des changements de goût des clients, par les prévisions ou par des actions marketing (séries limitées, rabais...) de l'entreprise ou de ses concurrents, fassent l'objet d'une

¹ C'est vrai pour des produits finis chers, comme c'est le cas dans l'industrie automobile où l'on observe périodiquement des carnets de commande de plusieurs mois pour certains nouveaux modèles

analyse régulière et rigoureuse, faute de quoi le pilotage de la CL ne restera pas sous contrôle. Les coûts de cette surveillance informationnelle sont faibles au regard de ceux induits par un pilotage n'assurant pas la cohérence décisionnelle dans la CL. L'organisation et le suivi de cette vigilance conditionnent la performance, voire la pérennité, de la CL.

Sur le plan des principes, les règles proposés sont relativement simples à mettre en œuvre. Leur mise en œuvre contractuelle est plus difficile lorsque les entités productives concernées n'appartiennent pas à la même entreprise. S'ajoute à cela le fait qu'un maillon de la chaîne peut appartenir à plusieurs CLs (Renault et PSA ont des fournisseurs de rang 1 ou 2 communs). Techniquement, la généralisation de la démarche proposée est immédiate et permet de mutualiser le risque mais elle pose alors un problème technique dans la rédaction contractuelle, les stocks de sécurité étant calibrés pour une demande agrégée. Le fournisseur peut être traité de manière indépendante par chacune des entités juridiques possédant les différentes chaînes de production concernées, ce qui ne change rien à la contractualisation mais suppose que les mêmes principes de pilotage soient retenus par tous. Pour améliorer l'efficacité, le fournisseur peut chercher à mutualiser lui-même le risque, ce qui suppose qu'il obtienne les informations de base des différentes entités juridiques pour pouvoir calculer lui-même les distributions de référence ; s'agissant d'informations stratégiquement sensibles, cette amélioration de performance a peu de chances de voir le jour. Accessoirement, il faut que le fournisseur dispose de cadres ayant la culture scientifique nécessaire pour déterminer les variables de commande.

CHAPITRE VII

MISE EN ŒUVRE ET BENCHMARKS

Introduction

Bien qu'alimenté par des données fictives, l'exemple qui a servi à illustrer le fonctionnement de la méthode de pilotage des flux-amont proposée en chapitre VI s'inspire de situations réelles rencontrées en CL automobile. Dans ce chapitre, nous présenterons les cas réels sur lesquels nous avons testé l'approche de MRP revisitée qui s'appuie sur l'exploitation des nomenclatures de planification pour le calcul desancements en production et la transmission d'informations aux fournisseurs.

L'objectif des applications présentées ici n'est pas de valider les résultats du chapitre précédent par l'intermédiaire d'une démarche expérimentale couvrant un large périmètre, mais de tester l'applicabilité des solutions proposées sur quelques cas d'application proposés par la DSCM de Renault. Les performances de la méthode ainsi testée sont appréciées par opposition à celles des règles de gestion actuellement en vigueur. Les mesures de performance concernent l'efficacité des méthodes (nombre de ruptures, quantités en rupture) et leur efficacité (valeur des stocks).

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire la méthodologie de benchmark avant de présenter les cas testés en détaillant la structure de la CL et la spécificité des flux considérés. La restitution des résultats se fera dans le §3 selon les indicateurs de performance retenus.

1. Méthodologie

Dans cette partie nous présenterons les choix méthodologiques qui ont orienté la mise en œuvre de la solution proposée en chapitre VI et l'analyse comparative des résultats avec la solution de référence¹. Nous commencerons par décrire la procédure de sélection des cas d'application avant de détailler les principes de modélisation et de simulation mobilisés dans cette partie.

¹ Par « solution de référence » nous faisons allusion aux règles de gestion actuellement mises en place par Renault pour le pilotage des flux-amont.

1.1. Sélection des cas d'application

Parallèlement aux travaux de thèse présentés ici, une cellule transversale a été mise en place au sein du DOP afin d'analyser des cas de variabilité avérés remontés par les UCM. En prenant part activement aux études réalisées par cette équipe, les cas proposés par le terrain ont constitué un vivier de cas d'application et de benchmark à exploiter.

En tout, une vingtaine d'études a été réalisée par le groupe de travail transversal. Près de la moitié de ces cas d'étude a été exploitée dans le but de tester la faisabilité de la méthode proposée en chapitre VI et de comparer ses performances à celles de la méthode de référence. Parmi cette dizaine de cas d'application, 3 cas ont été choisis pour présenter les résultats obtenus suite à l'application des solutions que nous préconisons. Les étapes de sélection des cas présentés dans ce chapitre sont explicitées par le logigramme de la Figure VII- 1.

Lors de l'analyse des cas remonté par le terrain par le groupe transversal, l'inefficacité (ruptures de stocks et déclenchement de procédures d'approvisionnement d'urgence) et l'inefficience (accumulation inutiles de stocks), qui caractérisaient les situations proposées par les usines, trouvaient leur origine dans des causes de natures différentes pouvant être regroupées en trois familles.

- Erreurs humaines : ce type d'erreur intervient généralement en phase de paramétrage manuel de certains SI. Elles provoquent des perturbations localisées ou généralisées selon le type de paramètre erroné. Une fois identifiées, des actions correctives et/ou préventives, pour éviter la récurrence, peuvent être envisagées. Ces causes non répétitives se situent en dehors de notre champ d'intérêt.
- Causes externes : en lien avec des événements externes difficilement prévisibles, ce type de cause de non performance impacte un périmètre plus ou moins large selon la nature de l'événement. Le lancement non-anticipé d'un modèle par la concurrence aura un impact sur les ventes (et mécaniquement sur l'approvisionnement des pièces) du modèle concurrencé. Une catastrophe climatique aura des conséquences plus globales en perturbant l'ensemble des approvisionnements contractés auprès du réseau de fournisseurs impactés par cet événement (une telle situation s'est produite après le tremblement de terre et le tsunami japonais de 2011).
- Causes en lien avec les processus de planification et d'expression des besoins : de caractère répétitives, ces causes de non performance sont expliquées par les facteurs d'instabilité de la demande prévisionnelle et de déformation de la demande commerciales

identifiées en deuxième partie de ce document. Ce sont les causes que nous cherchons à éliminer à travers notre proposition de pilotage des flux-amont. Les cas d'études, dont l'analyse révèle la présence de ce type de cause, sont retenus comme cas d'application et de benchmark potentiel.

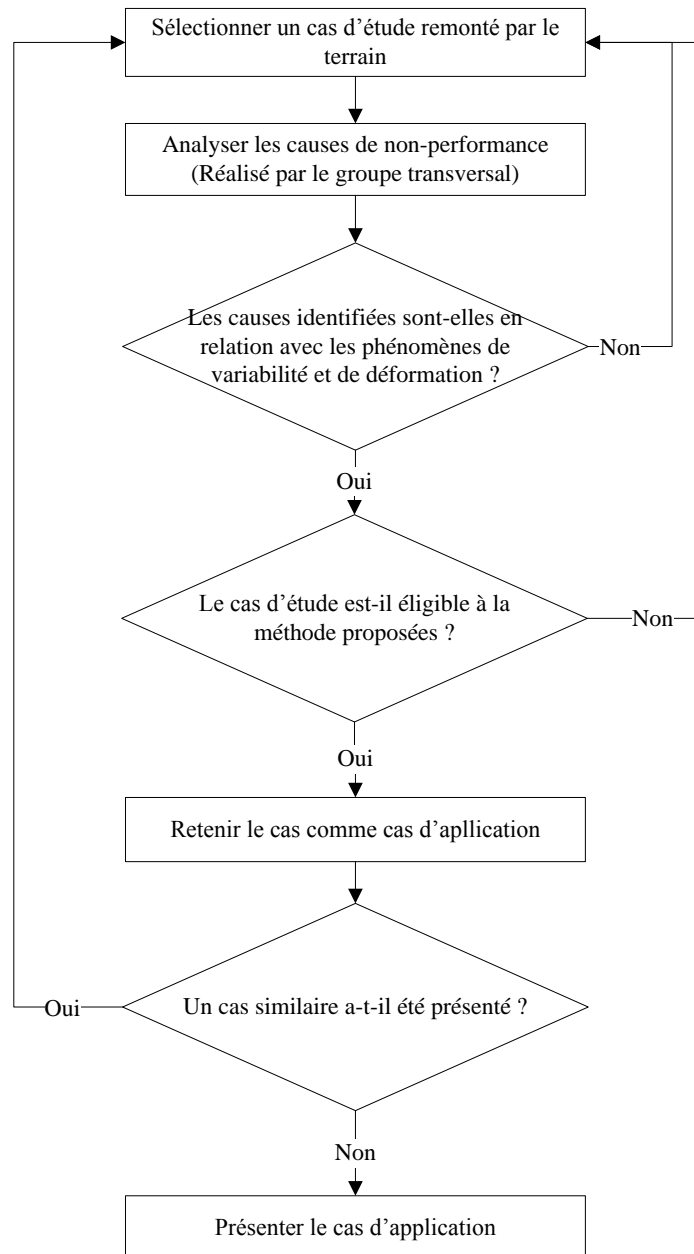


Figure VII- 1 : Logigramme de sélection des cas d'application

L'éligibilité du cas d'étude à la méthode proposée suppose que les composants concernés par la demande d'analyse, faite par les UCM, soient associés à des modules alternatifs ou optionnels et non à une combinaison d'objets comme c'est le cas des composants de jonction.

Les cas éligibles, présentant des causes de non-performance en lien avec les processus de planification et d'expression des besoins, sont retenus comme cas d'application de la méthode proposée et de benchmark avec la méthode de référence. La similitude que présentent certains cas, du point de vue de la structure de la CL, des liens de nomenclature associés au composants échangés en CL-amont et des décalages par les délais, rend inutile la présentation exhaustive de l'ensemble des cas d'application. Les 3 cas qui seront proposés dans le §2 présentent des structures de CL différentes et font intervenir des liens de nomenclature et des décalages par les délais hétérogènes.

1.2. Modélisation et simulation

Pour comparer les résultats de l'approche proposée à ceux des règles décrites en chapitre IV, actuellement utilisées par Renault, nous avons opté pour une démarche de modélisation puis de simulation dynamique des approvisionnements alimentée par des données historiques.

La solution de référence et la solution proposée sont modélisées puis simulées avec des périmètres et des conditions réels rigoureusement identiques. Les mêmes informations sont disponibles pour chacune des deux méthodes, mais l'usage qui en est fait diffère. Dans l'approche de référence adoptée par Renault, les nomenclatures de planification sont utilisées pour alimenter le processus de déclinaison de la demande commerciale qui lui-même alimente le processus de calcul et d'expression des besoins. Dans l'approche que nous proposons, ces mêmes nomenclatures de planification sont directement exploitées pour le dimensionnement des niveaux de rechargement utilisés pour le calcul des lancements.

Les nomenclatures de planification ainsi que les résultats de sa déclinaison, selon le processus décrit en chapitre V, proviennent des bases de données où sont sauvegardés les historiques de Renault. Les délais d'approvisionnement, les nomenclatures ainsi que les conditions initiales sont également issus des infos-services des SI de Renault.

La simulation de la solution proposée est réalisée en reconstituant les conditions réelles issues des historiques. Elle est réalisée sur une période de 6 mois, profondeur d'historique disponible dans les bases de données de Renault, caractérisée par l'absence de perturbations significatives de la demande finale et de problèmes de qualité. Afin d'éliminer l'action de facteurs d'interaction complexes, les benchmarks sont menés sur des parties de la CL qui ne sont pas en interaction avec d'autres parties de la CL globale. La simulation des cas

d'application, selon la méthode proposée, et l'analyse comparative des résultats sont réalisées selon l'approche formalisée par la figure ci-dessous.

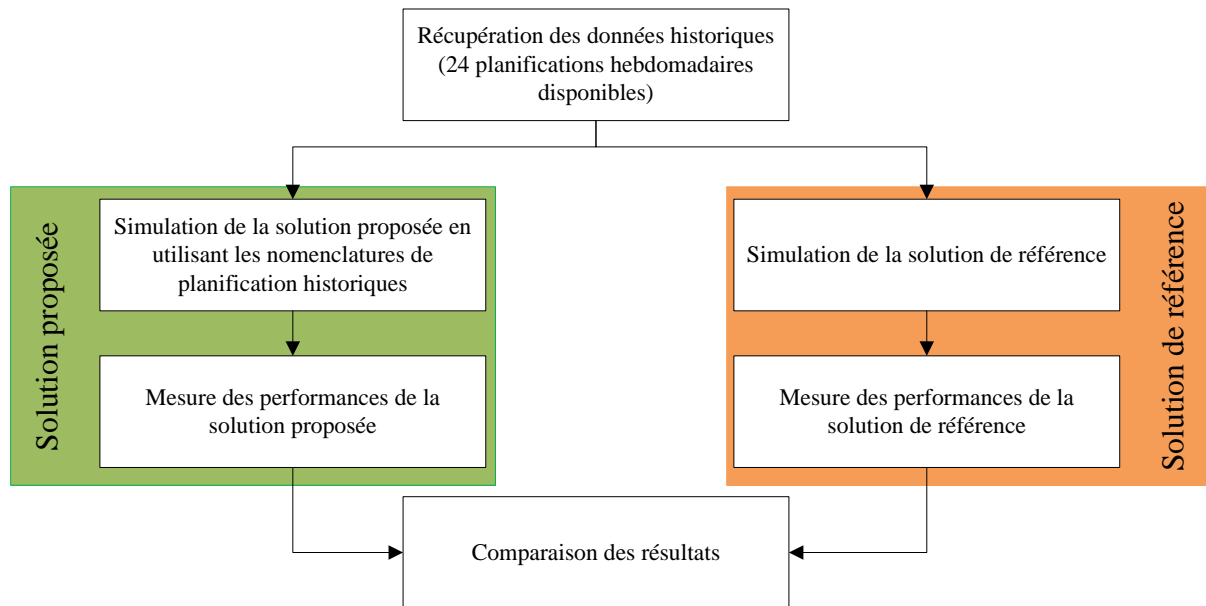


Figure VII- 2 : Méthodologie d'analyse comparative

La solution de référence est modélisée puis simulées en environnement contrôlé afin de reconstituer des mesures non disponibles dans les historiques. Avant d'être utilisée, les résultats de simulation de la solution de référence sont confrontés aux données réelles pour validation.

Lors de la simulation, les mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption par les délais sont appliqués aux données historiques dans une logique de fonctionnement dynamique du système de commande. Un certain nombre de règles, communes aux deux solutions, régissent le comportement des modèles en phase de simulation. Ces règles sont résumées par les points suivants.

- Il y a autant de calculs de lancement que de semaines disponibles dans l'historique.
- Les conditions initiales utilisées lors du premier calcul sont identiques pour les deux solutions
- Les calculs d'une période tiennent compte des décisions prises lors des calculs précédents dans une logique de fonctionnement dynamique.

- À l'apparition d'une rupture prévisionnelle, et lorsque les conditions le permettent, les procédures de transport d'urgence sont systématiquement déclenchées¹. C'est la règle qui est appliquée dans la réalité pour éviter des coûts prohibitifs consécutifs à un arrêt de chaîne.

Suite à la récupération des résultats de simulation, chaque maillon des CLs étudiées fait l'objet d'une analyse de performance relative. Avant de présenter les résultats de benchmark, nous commencerons par décrire les cas d'application retenus.

2. Description des cas d'application

Dans cette deuxième partie du chapitre VII, nous présentons les trois cas d'application qui ont été retenus pour illustrer l'application de la méthode proposée et en confronter les résultats à ceux de la méthode de référence. La présentation des cas se fera selon un ordre croissant de complexité caractérisant les différentes situations, elle concernera principalement la structure de la CL, les liens de nomenclature entre les biens échangés en CL-amont et les nomenclatures de planification ainsi que le détail des décalages par les délais associés aux flux physiques.

Les cas d'application 1 et 2 ont la particularité d'avoir été proposés par la même UCM qui assemble un modèle de grande consommation sur lequel une analyse approfondie de la nomenclature a été réalisée. Le but de cette analyse documentaire est de justifier économiquement le traitement en priorité des composants associés aux nomenclatures de planification au détriment des composants de jonction.

En effet, l'exploitation des nomenclatures de planification pour le pilotage des flux-amont exclue les composants de jonction dont la gestion doit être assurée par des méthodes d'approvisionnement spécifiques. Pour rappel, les composants de jonction sont utilisés pour lier physiquement des modules alternatifs ou pour assurer la cohérence technique d'une combinaison de modules alternatifs ou optionnels. Pour les cas étudiés ici, la valeur de ces composants représente moins de 21% de la valeur globale des composants approvisionnés pour l'assemblage d'un véhicule moyen du modèle considéré. La répartition de la valeur des

¹ Lorsque le recours aux procédures d'urgence n'est pas possible, on considère qu'il n'y a pas de rattrapage des quantités perdues et que la rupture n'est pas évitée.

composants approvisionnés sur un modèle de véhicule moyenne est donnée par la Figure VII-3.

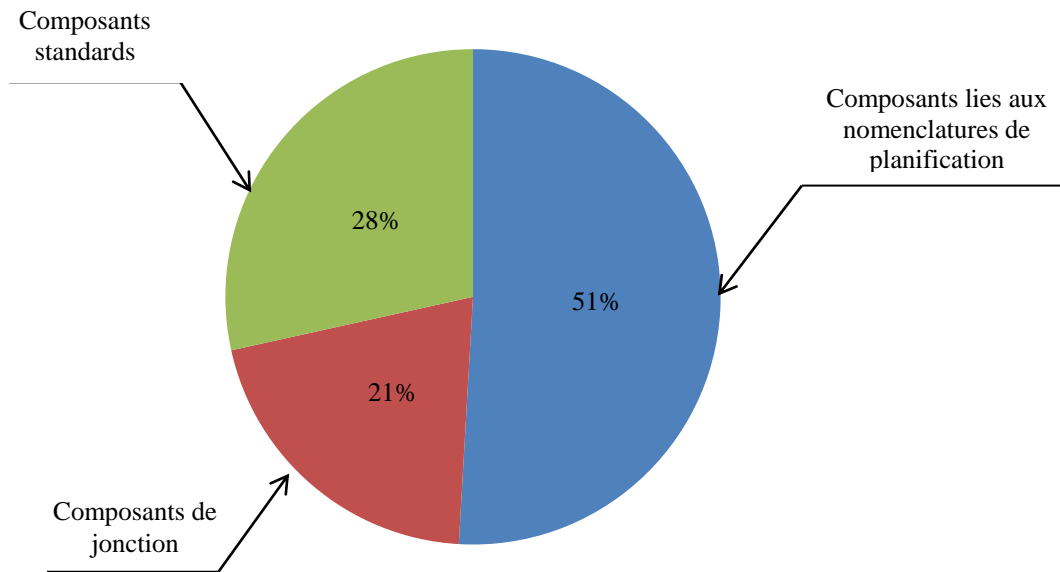


Figure VII- 3: Répartition de la valeur des composants approvisionnés pour un véhicule moyen selon la nature des composants

La Figure VII- 3 signifie qu'une application généralisée de l'approche proposée sur le modèle analysé ici permettrait d'assurer le pilotage amont de près de 80% de la valeur des composants approvisionnés.

2.1. Cas 1

Dans ce premier cas simple, nous considérons une CL-amont de configuration dyadique où la demande est tirée par une seule ligne d'assemblage finale en UCM. Nous nous intéressons à l'approvisionnement des commandes d'ouverture de portières (CO) dont le montage dépend du niveau d'équipement (NE) associé au véhicule. Au même titre que la motorisation ou le type de boîte de vitesse, le niveau d'équipement est traité comme un module alternatif car faisant appel à un kit de composants dont l'assemblage se fait en UCM.

L'UCM s'approvisionne auprès d'un fournisseur de commandes d'ouverture de porte avec un délai d'approvisionnement de 2 semaines. L'UCM est l'unique client du fournisseur pour ce type de composants. Les commandes d'ouverture de portes, auxquelles nous nous intéressons, sont utilisées uniquement par les trois niveaux d'équipement (NE_1 , NE_2 et NE_3) sur les 6 proposés sur le modèle de véhicule assemblé en UCM qui constituent l'ensemble des modules alternatifs pour le niveau d'équipement (un véhicule n'a qu'un et un seul niveau d'équipement).

Dans la solution de référence, l'UCM transmet ses besoins en composants à une fréquence hebdomadaire. Par conséquent, les lancements en production et les réceptions se font selon cette même périodicité.

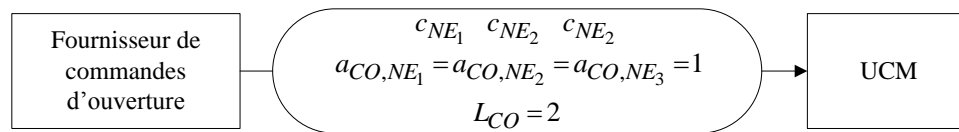


Figure VII- 4 : Flux physiques, liens de nomenclature et décalages (Cas 1)

La Figure VII- 4 décrit la structure de la CL du cas d'application 1 en spécifiant le délai d'obtention entre l'UCM cliente et son fournisseur (L_{CO}) ainsi que les coefficients de montage entre les commande d'ouverture et les niveaux d'équipement (a_{CO,NE_i}). L'arc indique le sens de circulation du flux physique. Parmi les niveaux d'équipement de l'ensemble \mathcal{E} , seuls NE_1 , NE_2 et NE_3 utilisent le type de composants dont il est question ici. Le délai L_{CO} intègre un temps de production et de transport vers le client.

Dans la solution proposée, les lancements sont calculés à l'aide d'un niveau de rechargement et des informations certaines de l'horizon gelé. Le niveau de rechargement est calculé à partir des nomenclatures de planification et de la production périodique globale des lignes d'assemblage. Dans notre cas, les nomenclatures de planification sont déduites de la demande commerciale¹, exprimée sur un horizon de 24 semaines. L'horizon gelé est d'une semaine. c_{NE_i} représente la prévision, en proportion moyenne de la production globale, d'utilisation de NE_i en UCM. L'information sur la production périodique globale de la ligne d'assemblage provient des plans de montage.

Le tableau ci-dessous regroupe les données d'entrée² nécessaire au déploiement de la solution proposée.

¹ L'information exploitée est le résultat de la découpe de la réponse industrielle à la demande commerciale (§1 chapitre V).

² Pour ce premier cas d'application et pour les autres, les données concernant la production et les nomenclatures de planification ne sont pas chiffrées. La non divulgation de données réelles, dont l'utilité ici est toute relative, répond à des obligations de confidentialité.

Composant	Coefficient de monte (a_{ik})	Décalages (λ_{ik})	Composantes de la nomenclature de planification (c_k)	Production périodique globale de la ligne (N_l)	Risque (α)
Commandes d'ouverture (CO)	$a_{CO,NE_1} = a_{CO,NE_2} = a_{CO,NE_3} = 1$	$\lambda_{CO,NE_1} = \lambda_{CO,NE_2} = \lambda_{CO,NE_3} = 3$	$c_{NE_1}, c_{NE_2}, c_{NE_3}$	N	$\alpha = 0,01\%$

Tableau VII- 1: Données d'entrée de la solution proposée (Cas1)

Dans la solution de référence, les nomenclatures de planification ne sont pas exploitées en tant que telles pour le pilotage des flux-amont. Elles sont transformées par le processus de déclinaison de la demande commerciale, développée en chapitre V, pour alimenter le processus de calcul et d'expression des besoins à l'origine des lancements en production. L'incertitude qui pèse sur la demande est couverte par un stock de sécurité calculé en UCM en utilisant la loi de flexibilité présentée dans le §2 du chapitre V. En reprenant les notations utilisée en chapitre VI, le stock de sécurité cible $SS_{i,t+L_i}$ d'un composant i est incorporé dans le calcul des lancements en production comme montré par la relation suivante :

$$LP_{it} = BN_{i,t+L_i} = BB_{i,t+L_i} + SS_{i,t+L_i} - [PS_{it} + \sum_{h=0}^{L_i-1} q_{i,t+h} - BB_{i,t+h}].$$

Le risque de rupture théorique retenu pour le dimensionnement du niveau de recomplètement dans la solution proposée et du stock de sécurité dans la solution de référence est $\alpha = 0,01\%$ ¹.

2.2. Cas 2

Le deuxième cas concerne une CL-amont en série où la demande est tirée par une seule ligne d'assemblage finale en UCM. Nous nous intéressons à l'approvisionnement de pots catalytiques (PC) en UCM et celui de monolithe (Mon) en usine de production de pots catalytiques. La partie de la CL étudiée présente des délais d'obtention longs pouvant atteindre 9 semaines.

L'UCM s'approvisionne en pots catalytiques auprès d'une plateforme d'importation (fournisseur de rang 1) avec un délai d'approvisionnement d'une semaine. Le rôle de la plateforme d'importation est de regrouper les commandes d'un certain nombre de clients géographiquement proches dans le but de massifier les flux d'approvisionnement lointains. La plateforme d'importation, qui ne réalise que des opérations de manutention, s'approvisionne

¹ Pour l'analyse comparative, le même taux de service cible théorique doit être utilisé par les deux solutions sans forcément être économiquement optimal.

auprès d'un fabricant de pots catalytiques (fournisseur de rang 2) avec un délai d'approvisionnement de 9 semaines. La production du type de pot catalytique approvisionné par l'UCM nécessite l'utilisation de monolithes que le fournisseur de rang 2 se procure auprès d'un fournisseur de rang 3 avec un délai d'approvisionnement de 4 semaines.

L'UCM est l'unique client du fournisseur de pots catalytiques auxquels nous nous intéressons. La fabrication du type de pot catalytique échangé dans cette partie de la CL nécessite l'utilisation de monolithes spécifiques. Le fournisseur de rang 3 n'a pas d'autres clients que le fournisseur de rang 2 pour les monolithes nécessaires à la fabrication des pots catalytiques dont il est question ici.

Le type de pot catalytique à monter sur un véhicule est directement lié au type de motorisation de ce même véhicule. Dans notre cas, le pot catalytique utilisé en UCM est associé à la motorisation M_1 .

Dans la solution de référence, l'UCM transmet ses besoins en composants à une fréquence hebdomadaire. Par conséquent, lesancements en production et les réceptions se font selon cette même périodicité.

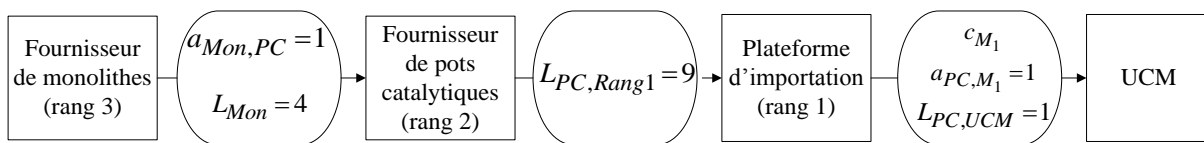


Figure VII- 5 : Flux physiques, liens de nomenclature et décalages (Cas 2)

La Figure VII- 5 décrit la structure de la CL du cas d'application 2 et spécifie les délais d'obtention entre chaque couple client/fournisseur ($L_{PC,UCM}$, $L_{PC,Rang1}$ et L_{Mon}) ainsi que les coefficients de monte entre le pot catalytique et le moteur auquel il est associé (a_{PC,M_1}). Les arcs indiquent le sens de circulation du flux physique. Parmi les éléments de l'ensemble de moteurs alternatifs \mathcal{E} , seul le moteurs M_1 est associé au le type de pot catalytique représenté ici. Les délais intègrent un temps de production, de transport et de préparation.

Dans la solution proposée, lesancements sont calculés à l'aide d'un niveau de recombplètement et des informations certaines de l'horizon gelé. Le niveau de recombplètement est calculé à partir des nomenclatures de planification et de la production périodique globale de la ligne d'assemblage. Dans notre cas, les nomenclatures de planification sont déduites de la demande commerciale exprimée sur un horizon de 24 semaines. L'horizon gelé est d'une semaine. c_{M_1} représente la prévision, en proportion moyenne de la production globale,

d'utilisation de M_1 en UCM. L'information sur la production périodique globale des lignes de production provient des plans de montage industriels.

Le tableau ci-dessous regroupe les données d'entrée nécessaire au déploiement de la solution proposée pour ce deuxième cas d'application.

Composant	Coefficient de monte (a_{ik})	Décalages (λ_{ik})	Composantes de la nomenclature de planification (c_k)	Production périodique globale de la ligne (N_l)	Risque (α)
Pots catalytique (PC)	$a_{PC,M_1} = 1$	$\lambda_{PC,M_1}^{rang1} = 2$ $\lambda_{PC,M_1}^{rang2} = 11$	c_{M_1}	N	$\alpha = 0,01\%$
Monolithes (Mon)	$a_{Mon,M_1} = 1$	$\lambda_{Mon,M_1} = 15$	c_{M_1}	N	$\alpha = 0,01\%$

Tableau VII- 2:Données d'entrée de la solution proposée (Cas2)

Dans la solution de référence, les nomenclatures de planification ne sont pas exploitées en tant que telles pour le pilotage des flux-amont. Elles sont transformées par le processus de déclinaison de la demande commerciale, développée en chapitre V, pour alimenter le processus de calcul et d'expression des besoins à l'origine des lancements en production. L'incertitude qui pèse sur la demande est couverte par un stock de sécurité calculé différemment selon l'importance du délai d'obtention qui sépare un client de son fournisseur. Dans la situation particulière des approvisionnements lointains (délai d'obtention supérieur ou égal à 4 semaines), une *loi de flexibilité-bis* remplace la loi de flexibilité spécifiée dans le §2.1.2.2 du chapitre V. Le stock de sécurité, issu de l'application de la loi de flexibilité-bis sur un composant i , est la somme des 4 besoins nets prévisionnels du composant pondérée par un coefficient K' permettant de faire le lien avec un taux de service cible. En reprenant les notations utilisées dans le §2.1.1, le stock de sécurité issu de la loi de flexibilité-bis s'obtient comme suit : $SS_{i,s} = K' \times \sum_{l=0}^3 BN_{i,s+L_l+l}$. Dans la CL considérée dans cette deuxième étude de cas, les fournisseurs de rang 1 et 2 utilisent la loi de flexibilité-bis pour le dimensionnement de leurs stock de sécurité ; l'UCM utilise, quant à elle, la version standard de la loi de flexibilité présentée dans le §2.1.2 du chapitre V.

Le calcul des lancements en production dans la solution de référence se fait de façon identique au cas 1 après intégration du stock de sécurité cible.

Le risque de rupture théorique retenu pour le dimensionnement du niveau de rechargement dans la solution proposée et du stock de sécurité dans la solution de référence est $\alpha = 0,01\%$.

2.3. Cas 3

Nous considérons la partie productive d'une CL-amont dont la demande est tirée par deux UCM (A et B). Ces deux usines partagent un même fournisseur de moteurs (UM) qui n'a pas d'autres clients pour les moteurs M_1 et M_2 auxquels nous nous intéressons dans le cadre de ce cas d'application. L'UM est approvisionnée en soupapes (S) spécifiques à l'assemblage des moteurs M_1 et M_2 par un seul et même fournisseur. Ce fournisseur ne possède pas d'autres clients pour le type de soupapes montées sur les moteurs M_1 et M_2 . La configuration décrite est celle d'une CL-amont divergente.

Dans la solution de référence les UCM, l'UM et le fournisseur de soupapes expriment des besoins calculés à une fréquence hebdomadaire. En conséquence, les lancements en production et les réceptions se font selon cette même périodicité.

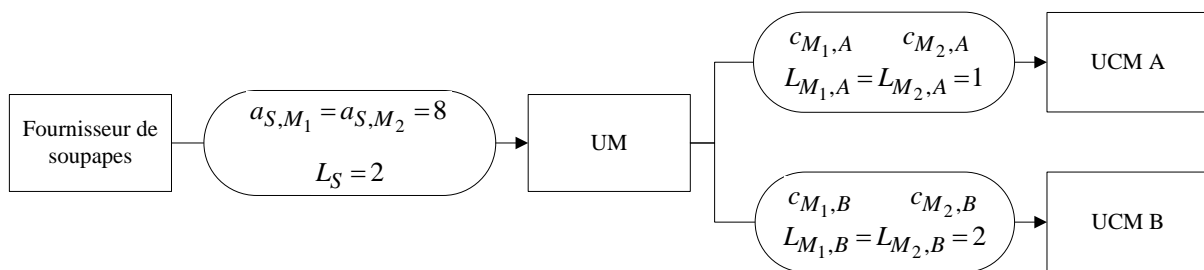


Figure VII- 6: Flux physiques, liens de nomenclature et décalages (Cas 3)

La Figure VII- 6 décrit la structure de la CL du cas d'application 3 et spécifie les délais d'obtention entre chaque couple client/fournisseur ($L_{M_i,A}$, $L_{M_i,B}$ et L_S) ainsi que les coefficients de monte entre les soupapes et les moteurs (a_{S,M_i}). Les arcs indiquent le sens de circulation du flux physique. Parmi les éléments des deux ensembles de moteurs alternatifs \mathcal{E}^A et \mathcal{E}^B , utilisés respectivement par les usines d'assemblage A et B, seuls les moteurs M_1 et M_2 utilisent le type de soupape représenté ici. Les délais $L_{M_i,A}$, $L_{M_i,B}$ and L_S intègrent un temps de production et de transport vers le client.

Le tableau ci-dessous regroupe les données d'entrée nécessaire au déploiement de la solution proposée pour ce troisième cas d'application.

Composant	Ligne	Coefficient de monte (a_{ik})	Décalages (λ_{ik})	Composantes de la nomenclature de planification (c_k)	Production périodique globale de la ligne (N_l)	Risque (α)
Moteurs (M)	A	$a_{M_1} = a_{M_2} = 1$	$\lambda_{M_1}^A = \lambda_{M_2}^A = 2$	$c_{M_1}^A, c_{M_2}^A$	N_A	$\alpha = 0,01\%$
	B	$a_{M_1} = a_{M_2} = 1$	$\lambda_{M_1}^B = \lambda_{M_2}^B = 3$	$c_{M_1}^B, c_{M_2}^B$	N_B	$\alpha = 0,01\%$
Soupapes (S)	A	$a_{S,M_1} = a_{S,M_2} = 8$	$\lambda_{S,M_1}^A = \lambda_{S,M_2}^A = 4$	$c_{M_1}^A, c_{M_2}^A$	N_A	$\alpha = 0,01\%$
	B	$a_{S,M_1} = a_{S,M_2} = 8$	$\lambda_{S,M_1}^B = \lambda_{S,M_2}^B = 4$	$c_{M_1}^B, c_{M_2}^B$	N_B	$\alpha = 0,01\%$

Tableau VII- 3:Données d'entrée de la solution proposée (Cas3)

Dans la solution proposée, les lancements sont calculés à l'aide d'un niveau de reemplètement et des informations certaines de l'horizon gelé. Le niveau de reemplètement est calculé à partir des nomenclatures de planification et de la production périodique globale des lignes d'assemblage. Dans notre cas, les nomenclatures de planification sont déduites de la demande commerciale exprimée sur un horizon de 24 semaines. L'horizon gelé est d'une semaine. $c_{M_i,A}$ et $c_{M_i,B}$ représentent la prévision, en proportion moyenne de la production globale, de consommation des modules M_i dans les usines A et B respectivement. L'information sur la production périodique globale des lignes de production provient des plans de montage industriels.

Dans la solution de référence, les nomenclatures de planification ne sont pas exploitées en tant que telles pour le pilotage des flux-amont. Elles sont transformées par le processus de déclinaison de la demande commerciale, développée en chapitre V, pour alimenter le processus de calcul et d'expression des besoins à l'origine des lancements en production. L'incertitude qui pèse sur la demande est couverte par un stock de sécurité calculé à chaque niveau de la CL en utilisant la loi de flexibilité décrite dans le §2 du chapitre V. En reprenant les notations utilisée en chapitre VI, le stock de sécurité cible $SS_{i,t+L_i}$ d'un composant i est incorporé dans le calcul des lancements en production comme montré par la relation suivante : $LP_{it} = BN_{i,t+L_i} = BB_{i,t+L_i} + SS_{i,t+L_i} - [PS_{it} + \sum_{h=0}^{L_i-1} q_{i,t+h} - BB_{i,t+h}]$.

Le risque de rupture théorique retenu pour le dimensionnement du niveau de reemplètement dans la solution proposée et du stock de sécurité dans la solution de référence est $\alpha = 0,01\%$.

3. Résultats

Pour des raisons de confidentialité, notamment en ce qui concerne le prix d'achat des composants utilisés pour le calcul du coût de possession des stocks, les résultats du benchmark seront présentés sous la forme de performances relatives. Les performances des deux solutions sont appréciées à travers le taux de service et le coût global de gestion hebdomadaire qui inclut les coûts de transports d'urgence et les coûts de possession des stocks.

Le taux de service est un indicateur d'efficacité, car il mesure l'aptitude qu'a une solution à atteindre les objectifs de niveau de risque fixés au préalable. Sur la période de simulation, il est le rapport entre le nombre de ruptures (éventuellement évitées par des procédures d'urgence) et le nombre total de périodes simulées.

Le coût de gestion est un indicateur d'efficacité économique. Le coût du transport d'urgence est considéré comme le différentiel de coût de transport relativement à un transport conventionnel. Son montant dépend de la quantité de composants à transporter, de leur poids unitaire et de leur volume après emballage. Le coût de possession des stocks est calculé en multipliant la valeur du stock détenu en début de période par un taux de possession fourni par le contrôle de gestion. Une moyenne du coût total sur la période de simulation est calculée pour obtenir un coût de gestion hebdomadaire.

La performance relative, mesurée par rapport au coût de gestion (CG), se calcul comme suit : $\frac{CG_p - CG_r}{CG_r}$ (les indices p et r font respectivement référence à la solution proposée et la solution de référence). En notant CP le coût de possession hebdomadaire moyen, et CT le coût hebdomadaire moyen des transports rapides, on a : $CG_p = CP_p + CT_p$ et $CG_r = CP_r + CT_r$. Une décomposition du coût de gestion relatif en coût de possession et en coût de dépannage d'urgence relatifs est proposée afin d'apprécier, selon leur nature, l'impact des coûts sur la performance globale.

3.1. Cas 1

En l'impossibilité d'avoir recours à des procédures de dépannage dans ce premier cas, l'appréciation de la performance relative entre la solution proposée et la solution de référence se fait selon le taux de service et le coût de possession relatif (le coût de possession est dans ce premier cas équivalent au coût de gestion).

Le Figure VII- 1 montre la performance relative de l'approche proposée rapportée à celle de l'approche de référence actuellement utilisée au niveau de l'UCM.

		UCM
Taux de service	Solution de référence	96%
	Solution Proposée	100%
Coûts	Coût de possession (valeur relative)	-17%
	Coût des procédures d'urgence (valeur relative)	-
	Coût de gestion hebdomadaire (valeur relative)	-17%

Tableau VII- 4 : Performance relative (Cas 1)

Dans la solution proposée, L'UCM n'est jamais en situation de rupture sur les 24 périodes de simulation et le coût de gestion inférieur de 17% par rapport à celui de la solution de référence. Ce cas montre la possibilité d'améliorer simultanément l'efficacité (taux de service) et l'efficience (coût de gestion hebdomadaire) de la politique d'approvisionnement de référence.

Malgré un taux de service cible identique pour les deux solutions testées, le taux de service observé de la solution de référence est inférieur à celui de la solution proposée. L'exploitation d'une information prévisionnelle instable et incohérente avec la demande commerciale pour le calcul des lancements conjuguée à un dimensionnement inadéquat des stocks de sécurité explique les mauvaises performances de la solution de référence.

Les coûts de gestion sont moindres dans la solution proposée. Cette réduction est directement liée à une diminution du stock moyen détenu.

3.2. Cas 2

Le Tableau VII- 6 montre les améliorations apportées par la solution proposée en terme de taux de service et de coût de gestion hebdomadaire à tous les niveaux de la CL-amont.

		UCM	Fournisseur de rang 1	Fournisseur de rang 2
Taux de service	Solution de référence	100%	100%	96%
	Solution Proposée	100%	100%	100%
Coûts	Coût de possession (valeur relative)	17%	-44%	-6%
	Coût des procédures d'urgence (valeur relative)	-	-	-100%
	Coût de gestion hebdomadaire (valeur relative)	17%	-44%	-11%

Tableau VII- 5 : Performance relative (Cas 2)

Dans la solution proposée, aucune rupture n'apparaît sur les 24 semaines de simulation. Dans la solution de référence, le fournisseur de pots catalytiques (fournisseur de rang 2) se trouve en situation de rupture en monolithes sur une période malgré un stock détenu moyen supérieur à celui relevé dans la solution proposée. Cette rupture déclenche un approvisionnement d'urgence couteux, compte tenu de la distance qui sépare le fournisseur de monolithes et le fabricant de pots catalytiques, en partie à l'origine des 11% d'augmentation du coût de gestion hebdomadaire.

Le coût de possession des pots catalytiques augmente de 17% au niveau de l'UCM pour un même taux de service, mais diminue de près de 44% au niveau de la plateforme d'importation (fournisseur de rang 2). Du fait du délai d'approvisionnement long entre le fournisseur de rang 2 et le fournisseur de rang 1, le niveau moyen de stock de pots catalytiques détenu par le fournisseur de rang 1 (que ce soit pour la solution de référence ou la solution proposée) est nettement supérieur à celui détenu par l'UCM ; la diminution du coût de possession de 44% au niveau de la plateforme d'importation est d'autant plus appréciable.

La solution de référence fait appel à la loi de flexibilité-bis qui contribue à graver l'instabilité de l'information prévisionnelle car exploitant des besoins nets prévisionnels pour le calcul des stocks de sécurité. C'est ce qui explique en partie les contre-performances de la solution de référence.

3.3. Cas 3

Le Tableau VII- 6 montre l'amélioration significatives de l'efficacité de la CL étudiée suite à l'application de la solution proposée.

		UCM A	UCM B	UM
Taux de service	Solution de référence	100%	100%	100%
	Solution Proposée	77%	62%	70%
Coûts	Coût de possession (valeur relative)	103%	329%	50%
	Coût des procédures d'urgence (valeur relative)	-100%	-100%	-100%
	Coût de gestion hebdomadaire (valeur relative)	-88%	-95%	-57%

Tableau VII- 6 : Performance relative (Cas 3)

Malgré un taux de service cible identique pour les deux solutions testées, le taux de service observé de la solution de référence est systématiquement inférieur à celui de la solution proposée. Ce constat trouve son explication dans l'exploitation d'une information prévisionnelle instable et incohérente avec la demande commerciale pour le calcul des lancements conjuguée à un dimensionnement inadéquat des stocks de sécurité.

Dans la solution de référence, l'usine B est souvent en situation de rupture à cause des règles de priorité qui privilégient la satisfaction des commandes passées par l'usine A (en UM, lorsque la quantité de valve nécessaire à la satisfaction des commandes des UCMs A et B, la priorité est donnée aux commandes de l'usine A).

L'amélioration significative du taux de service à tous les niveaux de la CL se traduit par une augmentation du coût de possession largement compensée par les économies réalisées sur les procédures d'urgence. Le coût de gestion hebdomadaire de la solution proposée est ainsi systématiquement inférieur à celui de la solution de référence.

Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible d'améliorer la performance du pilotage de la CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés en utilisant une approche revisitée de la MRP.

Cette approche a été testée avec succès sur plusieurs cas d'application dont 3 ont été présenté dans ce chapitre. Dans la solution de référence, l'instabilité et l'incohérence, avec la

demande commerciale, des informations diffusées le long de la CL, associées à des règles de protection inappropriées conduisent à de mauvaises performance en terme d'efficacité et d'efficience et déclenchent des comportements similaires à ceux décrits par Childerhouse et al. (2008). Les cas d'application présentés ici mettent en évidence la nécessité de traiter les causes racines de non performance plutôt que de tenter des améliorations à la marge des règles de calcul de stock de sécurité ou de paramétrage du processus de déclinaison de la demande commerciale.

Bien que la démarche proposée ait montré sa supériorité par rapport à la solution de référence sur les 3 cas d'applications, il est important de rappeler les conditions et les hypothèses sous-jacentes à la réussite de la version revisitée de la MRP. L'utilisation des nomenclatures de planification suppose leur stabilité ; dans le cas contraire, il est nécessaire d'anticiper les transformations de structure de la demande.

Sur les principes, l'application de la méthode proposée est relativement simple à appréhender notamment lorsque les acteurs de la CL appartiennent à une même entité juridique. Son implémentation est plus difficile lorsque les unités de production concernées n'appartiennent pas à la même compagnie ou que les fournisseurs appartiennent à plusieurs CL.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les entreprises intervenant dans des secteurs impliqués dans la production de masse de produits fortement diversifiés ont pour mission d'offrir une large diversité de produits finis de grande consommation tout en garantissant un délai commercial qui soit admissible par le client et compétitif dans un environnement concurrentiel. Lorsqu'on sait qu'il est financièrement et techniquement impossible de disposer en stock de l'ensemble, ou même d'une partie de la diversité offerte, cette équation difficile à résoudre du point de vue de la gestion de la chaîne logistique amont a fait l'objet d'un intérêt grandissant chez les industriels et dans la littérature spécialisée.

L'assemblage à la commande s'est imposé comme modèle de production incontournable permettant à la fois d'offrir une grande diversité de produits finis tout en garantissant des délais de mise à dispositions acceptables par les clients. L'organisation du système productif en ligne d'assemblage permet d'assurer la faisabilité d'une production de masse. Le modèle industriel d'assemblage à la commande repose sur une architecture modulaire des produits finis qui permet d'obtenir une grande variété de produits grâce à un assemblage de modules alternatifs ou optionnels, chacun remplissant une fonction particulière dans le fonctionnement du produit fini, interchangeables et limités en nombre. Chaque produit fini est vu alors comme une des nombreuses combinaisons possibles de modules alternatifs et optionnels.

Du point de vue du pilotage des flux-amont, le succès d'une stratégie d'assemblage à la commande repose sur l'hypothèse d'une disponibilité quasi immédiate des composants et modules nécessaires à l'assemblage d'un produit commandé. Cette condition, une fois remplie, permet l'affichage d'un délai commercial égal à la durée du cycle d'assemblage, généralement très courte, augmentée du délai de livraison. Afin de minimiser les coûts d'immobilisation, qu'implique une mise en stock des modules et composants utilisées en ligne d'assemblage, cette exigence a longtemps été satisfaite grâce à la proximité géographique du réseau de fournisseur. La philosophie du juste-à-temps a poussé les modèles de pilotage des flux amont vers cette voie en faisant reculer le point de pénétration de la commande tout en maintenant le même horizon de demande connue avec certitude. Le développement des technologies de l'information a permis de rendre concrètes ces stratégies à travers la l'approvisionnement synchrone et le *kanban*.

Les évolutions économiques récentes, en lien avec la mondialisation, le tarissement de certains marchés et l'émergence de nouveaux marchés en croissance ont peu à peu modifié le paysage industriel en déplaçant les bassins de consommation d'une part et les sites de production d'autre part. Cette nouvelle donne économique se traduit aujourd'hui par une dispersion géographique à échelle planétaire des sites de production et par un allongement des délais d'approvisionnements pour certains composants.

L'évolution structurelle du contexte industriel vient à contre-courant des conditions de fonctionnement du modèle d'assemblage à la commande pour la production de masse de produits fortement diversifiés. De nouvelles problématiques de pilotage des flux amont ont émergé de cette incohérence entre les méthodes utilisées et la nouvelle réalité du terrain. L'allongement des délais d'obtention de certains composants implique l'utilisation d'informations prévisionnelles pour le pilotage de leur approvisionnement. Les changements fréquents dans les habitudes de consommation, qui dictent les besoins en composants, excluent l'utilisation d'historiques pour la gestion des approvisionnements lointains. Dans ces conditions, ce sont les décisions de production des lignes d'assemblage, elles même découlant de prévisions de vente, qui tirent la demande en modules alternatifs, optionnels et en composants à tous les niveaux de la chaîne logistique amont. Une utilisation inadéquate des informations prévisionnelles provoque des comportements non maîtrisés en CL-amont, pouvant s'apparenter au phénomène d'effet coup de fouet bien connu en CL-aval, à l'origine de rupture de stocks, de mobilisation de moyens de dépannages coûteux et d'accumulation de stocks inutiles.

Le travail de recherche restitué dans ce mémoire s'inscrit dans cette problématique générale du mode d'exploitation de l'information prévisionnelle en CL-amont dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés dans un contexte de dispersion géographique des unités de production. Il émane d'une demande formulée par l'entreprise Renault qui désire réadapter ses méthodes de pilotage des flux amont. La conjoncture de crise économique, qui a fortement marqué le secteur automobile, a accentué les conséquences d'une gestion inefficace des flux amont, plaçant la problématique du pilotage des flux amont au cœur des préoccupations de la direction de la chaîne logistique de Renault.

Notre travail s'est réalisé en trois grandes étapes à l'origine du découpage du présent mémoire en autant de parties. Dans un premier temps, nous avons tenté de positionner la problématique décrite par Renault dans un champ de recherche plus large qui est celui de l'exploitation de l'information prévisionnelle en CL-amont dédiée à la production de masse

de produits fortement diversifiés. En projetant la problématique étudiée sur grille d'analyse, construite à l'issue d'une recherche bibliographique, nous avons pu identifier quelques contributions clés à notre domaine d'intérêt, mais surtout, nous avons mis en évidence les lacunes persistantes dans l'étude des phénomènes d'effet coup de fouet, de partage et d'exploitation d'informations en CL-amont. En fin de cette première étape, à l'éclairage des éléments de contexte et d'analyse de la littérature spécialisée, nous avons formalisé ce qui constitue l'hypothèse centrale de la thèse : « l'exploitation des informations situées au-delà de l'horizon gelé par des logiques de prévision à des niveaux de nomenclature trop bas, associée à des politiques de sécurisation inadéquates, est en partie à l'origine du phénomène d'ECF en CL-amont ».

Dans la deuxième étape, nous avons soumis l'hypothèse de recherche à la réalité du terrain et validé ce qui, à ce stade d'avancement, ne constituait qu'une intuition. Pour commencer ce travail de validation, nous avons procédé à des mesures empiriques permettant de mettre en évidence l'existence de phénomènes de variabilité croissante des prévisions au fur et à mesure de leur déclinaison vers le niveau de nomenclature des produits finis. Cette première validation nous a encouragé à aller encore plus loin et à mettre en évidence les mécanismes à l'origine de la variabilité des prévisions. C'est ainsi que nous avons engagé une modélisation complète des processus de déclinaison de la demande commerciale et de calcul et expression des besoins. L'analyse de ces processus, du point de vue de leur capacité à maintenir la stabilité des prévisions et la qualité de l'information commerciale d'origine, a permis de clairement mettre en évidence la validité de l'hypothèse de recherche.

Dans la troisième étape de notre travail, nous nous sommes concentrés sur l'élaboration d'une version revisitée de la MRP adaptée au contexte étudié et répondant aux exigences d'efficacité et d'efficience en pilotage de la CL-amont. Le formalisme de la MRP, utilisé par Renault et largement répondu dans le secteur de la production de masse de produits fortement diversifiés, a constitué notre environnement de référence pour le pilotage des flux amont. L'adaptation visée a consisté à rendre compatible les mécanismes classiques de la MRP avec l'exploitation, en environnement partiellement ou complètement incertain, des nomenclatures de planification. Cette nouvelle façon d'exploiter la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux-amont a été développée autour de relations analytiques permettant une prise en compte de problèmes de qualité, un fonctionnement en mode multi-client et une prise en charge de longueurs d'horizons gelés hétérogènes en réponse à l'hétérogénéité des gammes produits et des marchés de commercialisation. La solution proposée a été

numériquement illustrée sur un exemple exposé de bout en bout et a montré sa supériorité sur les pratiques actuellement en vigueur chez Renault à travers sa mise à l'épreuve sur plusieurs cas d'application.

Le succès de la démarche que nous proposons repose sur plusieurs conditions. La première concerne la qualité de l'information exploitée pour le pilotage de la CL-amont. Les nomenclatures de planification, bien qu'interprétées comme des probabilités, doivent être caractérisée par une certaine stabilité sur plusieurs cycles de planification successifs. L'horizon concerné par cette stabilité est celui qui correspond au plus long délai d'approvisionnement cumulé des composants gérés dans le cadre du pilotage des flux amont. Au-delà de cette horizon, il est nécessaire d'anticiper les changements de structure de la demande afin d'éviter des modifications trop tardives au niveau des prévisions pouvant impacter le bon fonctionnement de la CL-amont ; c'est la deuxième condition de réussite de la démarche proposée. Une troisième condition de succès est liée à la coopération des acteurs de la CL-amont. En introduction générale, nous avons évoqué les limites organisationnelles d'un pilotage centralisé de la CL et les effets pervers d'un pilotage décentralisé. Dans la démarche globale que nous proposons, il est possible d'envisager un mode de fonctionnement décentralisé encadré par des accords contractuels conclus entre les fournisseurs et le client qui tire la demande. Ce type de relation limite les prises de décisions locales inadaptées, mais nécessite l'adhésion des fournisseurs qui doivent s'engager, sous peine de sanctions, à répondre à la demande d'un client dans la limite du niveau de rechargement transmis par le maillon qui tire la demande dans la version revisitée de la MRP. Le client, quant à lui, s'engage à respecter les niveaux de rechargement et à assumer les surcoûts en cas de dépassement de ces seuils. Cette esquisse de relation contractuelle entre client et fournisseurs nous renvoie aux deux premières conditions de réussite qui ont pour rôle de minimiser le dépassement des seuils que représentent les niveaux de rechargement.

La principale limite de la démarche proposée est qu'elle ne prend pas en charge le pilotage des flux-amont des composants de jonction si leur point de pénétration de la commande est en dehors de l'horizon gelé (autrement la demande en composants de jonction est certaine) ; d'autres méthodes doivent être alors mobilisées pour gérer ce type de composants. La conséquence de cette limite est relativisée par le poids financier limité que représente cette catégorie de composants. D'autre part, l'élargissement du champ de la conception modulaire, qui cherche à standardiser les interfaces, tend à réduire le nombre de

composants de jonction en augmentant le nombre de composants systématiquement montés sur ligne d'assemblage.

En résumé, l'exploitation des nomenclatures de planification pour le pilotage des flux amont dans un environnement MRP est une solution qui permet d'éviter les conséquences, révélées en deuxième partie, d'une interprétation de la demande commerciale à des niveaux trop bas de la nomenclature. Elle offre la possibilité de prendre en compte l'incertitude de la demande pour un fonctionnement efficace de la CL-amont et un dimensionnement au plus juste des niveaux de rechargement et des stocks de sécurité qui en découlent. La MRP revisitée conserve les mécanismes simples d'explosion des nomenclatures et d'absorption par les délais qui la rendent facile à implémenter.

BIBLIOGRAPHIE

Agrawal, S., Sengupta, R.N. et Shanker, K. (2009) "Impact of information sharing and lead time on bullwhip effect and on-hand inventory", *European Journal of Operational Research*, n° 192, p.576–593.

Amblard, F. et Phan, D. (2006) *Modélisation et simulation multi-agents*, Paris, Lavoisier.

Anthony, R.N. (1965) *Planning and Control Systems: a framework for analysis*, Harvard University Press.

Bailey, K. et Francis, M. (2008) "Managing information flows for improved value chain performance", *International Journal of Production Economics*, n° 111, p. 2-12.

Balan, S., Vratb, P. et Kumarc, P. (2009) "Information distortion in a supply chain and its mitigation using soft computing approach", *The International Journal of Management Science*, n° 37, p.282 – 299.

Bayraktar, E., Koh, L.S.C., Gunasekaran, A., Sari, K. et Tatoglu, E. (2008) "The role of forecasting on bullwhip effect for E-SCM applications", *International Journal of Production Economics*, n° 113, p.193–204.

Ben-Tal, A., Golany, B. et Shtern, S. (2009) "Robust multi-echelon multi-period inventory control", *European Journal of Operational Research*, n° 199, p. 922-935.

Bertrand, J.W.M., Zuijderwijk, M. et Hegge, H.M.H. (2000) "Using hierarchical pseudo bills of material for customer order acceptance and optimal material replenishment in assemble to order manufacturing of non-modular products", *International Journal of Production Economics*, n° 66, p. 171-184.

Blackburn, J.D., Kropp, D.H. et Millen, R.A. (1985) "MRP system nervousness : causes and cures", *Engineering Costs and Production Economics*, n° 9, p. 141-146.

Bolarín, F.C., Frutos, A.G. et McDonnell, L.R. (2009) "The Influence of Lead Time Variability on Supply Chain Costs:Analysis of Its Impact on the Bullwhip Effect", *The IUP Journal of Supply Chain Management*, Vol. 6, n° 3, p. 16-26.

Büchel, A. (1982) "An overview of possible procedures for stochastic MRP", *Engineering Costs and Production Economics*, n° 6, p. 43-51.

Büchel, A. (1983) "Stochastic material requirements planning for optional parts", *International Journal of Production Research*, Vol. 21, n° 4.

Buzacott, J.A. et Shanthikumar, J.G. (1994) "Safety stocks versus safety time in MRP controlled Production systemss", *Management Science*, Vol. 40, n° 12, p. 1678-1688.

Cachon, G.P. et Fisher, M. (2000) "Supply chain inventory management and the value of shared information", *Management Science*, Vol. 46, n° 8, p. 1032-1048.

Cachon, G.P. et Lariviere, M.A. (2001) "Contracting to assure supply : how to share demand forecasts in a supply chain", *Management Science*, Vol. 47, n° 5, p. 629-646.

Cachon, G.P., Randall, T. et Schmidt, G.M. (2007) "In Search of the Bullwhip Effect", *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 9, n° 4, p. 457-479.

Camisulis, C. et Giard, V. (2010) "Détermination des stocks de sécurité dans une chaîne logistique-amont dédiée à une production de masse de produits fortement diversifiés", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 44, p. 975-1010.

Camisullis, C. (2008) *Les déterminants de la capacité d'une chaîne logistique amont*, Thèse pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de Gestion.

Carlson, R.C. et Yano, C.A. (1986) "Safety stocks in MRP-systems with emergency setups for components", *Management Science*, Vol. 32, n° 4, p. 403-412.

Chan, F.T.S., Chung, S.H. et Wadhwa, S. (2004) "A heuristic methodology for order distribution in a demand driven collaborative supply chain", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, n° 1, p. 1-19.

Chang, A.C. (1985) "The interchangeability of safety stocks and safety lead time", *Journal of Operations Management*, Vol. 6, n° 1, p. 35-42.

Chatfield, D.C., Kim, J.G. et Harris, T.P. (2004) "The Bullwhip Effect—Impact of Stochastic Lead Time, Information Quality, and Information Sharing: A Simulation Study", *Production and Operations Management*, Vol. 13, n° 4, p.340–353.

Chen, H., Chen, J. et Chen, Y. (2006) "A coordination mechanism for a supply chain with demand information updating", *International Journal of Production Economics*, n° 103, p. 347-361.

Cheng, L.-C. (2009) "Impact of inventory policy consistency on the three stage supply chain performance", *Journal of Academy of Business and Economics*, Vol. 9, n° 4, p. 33-53.

Chen, L. et Lee, H.L. (2009) "Information Sharing and Order Variability Control Under a Generalized Demand Model", *Management Science*, Vol. 55, n° 5, p.781–797.

Childerhouse, P., Disney, S.M. et Towill, D.R. (2008) "On the impact of order volatility in the European automotive sector", *International Journal of Production Economics*, n° 114, p. 2-13.

Croson, R. et Donohue, K. (2005) "Upstream versus downstream information and its impact on the bullwhip effect", *System Dynamics Review*, Vol. 21, n° 3, p. 249-260.

Da Silveira, G., Borenstein, D. et Fogliatto, F.S. (2001) "Mass customization : Literature review and research directions", *International Journal of Production Economics*, n° 72, p. 1-13.

Dauphine Recherches en Management (2010) *L'état des entreprises 2011*, La découverte.

De Bodt, M.A., Van Wassenhove, L.N. et Gelders, L.F. (1982) "Lot sizing and safety stock decisions in an MRP system with demand uncertainty", *Engineering Costs and Production Economics*, n° 6, p. 67-75.

Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R. et Towill, D.R. (2002) "Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chains", *International Journal of Production Economics*, n° 78, p.133-144.

Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R. et Towill, D.R. (2003) "Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach", *European Journal of Operational Research*, n° 147, p.567-590.

Dejonckheere, J., Disney, S.M., Lambrecht, M.R. et Towill, D.R. (2004) "The impact of information enrichment on the Bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective", *European Journal of Operational Research*, n° 153, p.727-750.

Disney, S.M. et Towill, D.R. (2003) "On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy", *The International Journal of Management Science*, n° 31, p.157 - 167.

Dolgui, A. et Prodhon, C. (2007) "Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art", *Annual Reviews in Control*, n° 31, p.269-279.

Ertunga, O.C. et Metin, C. (2009) "Reverse bullwhip effect in pricing", *European Journal of Operational Research*, n° 192, p.302-312.

Forrester, J.W. (1961) *Industrial Dynamics*, New York, MIT Press.

Ganesh, M., Raghunathan, S. et Rajendran, C. (2007) "The value of information sharing in a multi-product supply chain with product substitution", *IIE*, n° 40, p.1124-1140.

Geary, S., Disney, S.M. et Towill, D.R. (2006) "On bullwhip in supply chains—historical review, present practice and expected future impact", *International Journal of Production Economics*, Vol. 101, p.2-18.

Giard, V. (2003) *Gestion de la production et des flux*, Paris, Economica.

Giard, V. et Mendy, G. (2007) "Production à flux tirés dans une chaîne logistique", *Revue Française de Gestion Industrielle*, Vol. 26, p. 87 - 110.

Giard, V. et Sali, M. (2012) "Pilotage d'une chaîne logistique par une approche de type MRP dans un environnement partiellement aléatoire", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 46, n° 1, p. 73-102.

Guerrero, H.H., Baker, K.R. et Southard, M.H. (1986) "The dynamics of hedging the master schedule", *International Journal of Production Research*, Vol. 24, n° 6, p. 1475-1483.

Guide, V.D.R.J. et Srivastava, R. (2000) "A review of techniques for buffering against uncertainty with MRP systems", *Production Planning & Control*, Vol. 11, n° 3, p. 223 - 233.

Huang, G.Q., Lau, J.S.K. et Mak, K.L. (2003) "The impact of sharing production information on supply chain dynamics : a review of the literature", *International Journal on Production Research*, Vol. 41, n° 7, p. 1483-1517.

Huang, G.Q., Lau, J.S.K., Mak, K.L. et Liang, L. (2005a) "Distributed supply-chain project rescheduling: part I—impacts of information-sharing strategies", *International Journal of Production Research*, Vol. 43, n° 24, p. 5107-5129.

Huang, G.Q., Lau, J.S.K., Mak, K.L. et Liang, L. (2005b) "Distributed project scheduling with information sharing in supply chains: part II—theoretical analysis and computational study", *International Journal of Production Research*, Vol. 43, n° 23, p.4899–4927.

Inderfurth, K. et Minner, S. (1998) "Safety stocks in multi-stage inventory systems under different service measures", *European Journal of Operational Research*, n° 106, p. 57-73.

Jung, H., Chen, F.F. et Jeong, B. (2007) "Decentralized supply chain planning framework for third party logistics partnership", *Computers & Industrial Engineering*, n° 55, p.348–364.

Kadipasaoglu, S.N. et Sridharan, S.V. (1997) "Measurement of instability in multi-level MRP systems", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, n° 3, p. 713-737.

Kelepouris, T., Miliotis, P. et Pramatari, K. (2007) "The impact of replenishment parameters and information sharing on the bullwhip effect: A computational study", *Computers & Operations Research*, n° 35, p.3657 – 3670.

Ketzenberg, M.E., Rosenzweig, E.D., Marucheck, A.E. et Metters, R.D. (2006) "A framework for the value of information in inventory replenishment", *European Journal of Operational Research*, n° 182, p.1230–1250.

Koh, S.C.L., Saad, S.M. et Jones, H.M. (2002) "Uncertainty under MRP-planned manufacture: review and categorization", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, n° 10, p. 2399-2421.

Lagodimos, A.G. et Anderson, E.J. (1993) "Optimal positioning of safety stocks in MRP", *International Journal of Production Research*, Vol. 31, n° 8, p. 1797-1813.

Lamothe, J. et Aldanondo, M. (2001) "Une approche d'ingénierie intégrée pour la logistique: intérêts et limites de la coopération", *3ème conférence Francophone de Modélisation et Simulation Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels - Troyes (France)*.

Lamouri, S. et Thomas, A. (2000) "The two level master production schedule and planning bills in a just in time MRP context", *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, p. 409-415.

Lau, J.S.K., Huang, G.Q. et Mak, K.L. (2004) "Impact of information sharing on inventory replenishment in divergent supply chains", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, n° 5, p.919–941.

Lee, H.L., Padmanabhan, V. et Seungjin, W. (1997) "Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect", *Management Science*, Vol. 43, n° 4, p. 546-558.

Lee, L.H., Padmanabhan, V. et Whang, S. (2004a) "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect", *Management Science*, Vol. 50, n° 12, p.1875–1886.

Lee, H.L., Padmanabhan, V. et Whang, S. (2004b) "Comments on "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect"", *Management Science*, Vol. 50, n° 12, p.1887–1893.

Li, Z. et Gao, L. (2008a) "The Effects of Sharing Upstream Information on Product Rollover", *Production and Operations Management*, Vol. 17, n° 5, p. 522-531.

Liu, M., Vepkhvadze, N. et Srinivasan, M.M. (2009) "What is the value of real-time shipment tracking information ?", *IIE*, n° 41, p.1019–1034.

Li, L. et Zhang, H. (2008b) "Confidentiality and Information Sharing in Supply Chain Coordination", *Management Science*, Vol. 54, n° 8, p.1467–1481.

Mendy-Bilek, G. (2007) *Apport de la production synchrone dans l'amélioration du pilotage de la production sur une chaîne logistique*, Thèse pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de Gestion.

Moinzadeh, K. (2002) "A Multi-Echelon Inventory System with Information Exchange", *Management Science*, Vol. 48, n° 3, p.414–426.

Molinder, A. (1997) "Joint optimisation of lot-sizes, safety stocks and safety lead times in an MRP system", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, n° 4, p. 983-994.

Nienhaus, J., Ziegenbein, A. et Schoensleben, P. (2006) "How human behaviour amplifies the bullwhip effect. A study based on the beer distribution game online", *Production Planning & Control*, Vol. 17, n° 6, p. 547-557.

O'Donnell, T., Humphreys, P., McIvor, R. et Maguire, L. (2009) "Reducing the negative effects of sales promotions in supply chains using genetic algorithms", *Expert Systems with Applications*, n° 36, p.7827–7837.

Orlicky, J. (1975) *Material Requirement Planning*, New-York, McGraw-Hill.

Ouyang, Y. (2007) "The effect of information sharing on supply chain stability and the bullwhip effect", *European Journal of Operational Research*, n° 182, p.1107–1121.

Ouyang, Y. et Li, X. (2010) "The bullwhip effect in supply chain networks", *European Journal of Operational Research*, n° 201, p.799–810.

Paché, G. (1994) *La logistique : enjeux stratégiques*, Paris, Vuibert.

Pereira, J., Takahashi, K., Ahumada, L. et Paredes, F. (2009) "Flexibility dimensions to control the bullwhip effect in a supply chain", *International Journal of Production Research*, Vol. 47, n° 22, p.6357–6374.

Persona, A., Battini, D., Manzini, R. et Pareschi, A. (2007) "Optimal safety stock levels of subassemblies and manufacturing components", *International Journal of Production Economics*, n° 100, p. 147-159.

Puig, A. et Collectif Elenbi (2003) *L'automobile : Marchés - Acteurs - Stratégies*, Paris, Elenbi - Electronics Business Group.

Renault S.A. (2010) *Rapport d'activité annuel*.

Renault S.A. (2011) *Rapport d'activité annuel*.

Ryu, S.-J., Tsukishima, T. et Onari, H. (2009) "A study on evaluation of demand information-sharing methods", *International Journal of Production Economics*, n° 120, p. 182-189.

Salvador, F., Forza, C. et Rungtusanatham, M. (2002) "Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions", *Journal of Operations Management*, n° 20, p.549–575.

Souilah, S. (2008) *Reengineering du pilotage des flux dans une relation client fournisseur: Application au cas de l'industrie automobile*, Thèse pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de l'Ingénieur.

Springer, M. et Kim, I. (2010) "Managing the order pipeline to reduce supply chain volatility", *European Journal of Operational Research*, n° 203, p.380–392.

Sucky, E. (2009) "The bullwhip effect in supply chains — An overestimated problem ?", *International Journal of Production Economics*, n° 118, p.311–322.

Thonemann, U.W. (2002) "Improving supply-chain performance by sharing advance demand information", *European Journal of Operational Research*, n° 142, p. 81-107.

Viswanathan, S., Widiarta, H. et Piplani, R. (2007) "Value of information exchange and synchronization in a multi-tier supply chain", *International Journal of Production Research*, Vol. 45, n° 21, p.5057–5074.

Wang, J., Jia, J. et Takahashi, K. (2005) "A study on the impact of uncertain factors on information distortion in supply chains", *Production Planning & Control*, Vol. 16, n° 1, p. 2-11.

Wangphanich, P., Kara, S. et Kayis, B. (2010) "Analysis of the bullwhip effect in multi-product, multi-stage supply chain systems – a simulation approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 48, n° 15, p.4501–4517.

Winjgaard, J. et Wortmann, J.C. (1985) "MRP and inventories", *European Journal of Operational Research*, n° 20, p. 281-293.

Wong, W.K., Qi, J. et Leung, S.Y.S. (2009) "Coordinating supply chains with sales rebate contracts and vendor-managed inventory", *International Journal of Production Economics*, n° 120, p.151–161.

Wright, D. et Yuan, X. (2008) "Mitigating the bullwhip effect by ordering policies and forecasting methods", *International Journal of Production Economics*, n° 113, p.587–597.

Wu, Y.N. et Cheng, E.T.C. (2008) "The impact of information sharing in a multiple-echelon", *International Journal of Production Economics*, n° 115, p. 1-11.

Yee, S.T. (2005) "Impact analysis of customized demand information sharing on supply chain performance", *International Journal of Production Research*, Vol. 43, n° 16, p.3353–3373.

Zhang, X. (2004) "The impact of forecasting methods on the bullwhip effect", *International Journal of Production Economics*, n° 88, p.15–27.

Zhao, X., Lai, F. et Lee, T.S. (2001) "Evaluation of safety stock methods in multilevel material requirements planning (MRP) systems", *Production Planning & Control*, Vol. 12, n° 8, p. 794-803.

Zhao, X. et Xie, J. (2002) "Forecasting errors and the value of information sharing in a supply chain", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, n° 2, p. 311-335.

ANNEXES

Liste des Annexes

Annexe 1 : Fiche de proposition de sujet pour une convention CIFRE----- 214

Annexe 2 : Implantations industrielles du groupe Renault et volumes de ventes 2011 (Renault S.A., 2011)----- 215

Annexe 3 : valeurs de α en cas de nullité coût variable direct des unités approvisionnées en urgence ----- 216

Annexe 4 : valeurs de α en présence d'un coût fixe et d'un coût variable direct d'approvisionnement en urgence ----- 218

Annexe 1 : Fiche de proposition de sujet pour une convention CIFRE

Direction : Direction de la Supply Chain Monde

Département : Département d'Organisation des Processus

Titre : « Excitabilité de la Supply Chain »

- **Thème de recherche :** Propagation des perturbations lors de l'enchaînement des décisions de planification et d'approvisionnement dans une chaîne logistique.
- **Intérêt du travail de recherche pour l'entreprise :** Les travaux récents sur l'« effet coup de fouet » ont montré qu'une perturbation minimale apparue à un bout de la chaîne logistique pouvait avoir de fortes conséquences à l'autre extrémité. Ce phénomène est général et s'applique aussi aux décisions locales dans un processus d'approvisionnement et de planification séquentiel.

Dans une optique de maximiser les ventes avec des stocks minimaux, les effets dynamiques doivent être intégrés pour atteindre un stock global optimal sur la chaîne logistique. L'objectif de la thèse est de montrer les effets combinés du coup de fouet (aléa ponctuel hors tolérance), de la longueur du film ferme (l'horizon de la production ordonnancée), du mode de programmation des ateliers de mécanique, et de la diversité véhicule sur les niveaux de stock de l'entreprise, les capacités installées aux extrémités de la chaîne logistique (fournisseurs, moyens de distribution). L'analyse des algorithmes des systèmes de planification et d'approvisionnement doit permettre de calibrer le niveau d'« excitabilité » de notre Supply Chain depuis l'amont jusqu'à l'aval.

- **Description des missions :**

Benchmark des stratégies d'amortissement de l'« effet coup de fouet »

Analyse de l'excitabilité de la chaîne logistique

Modélisations des inducteurs

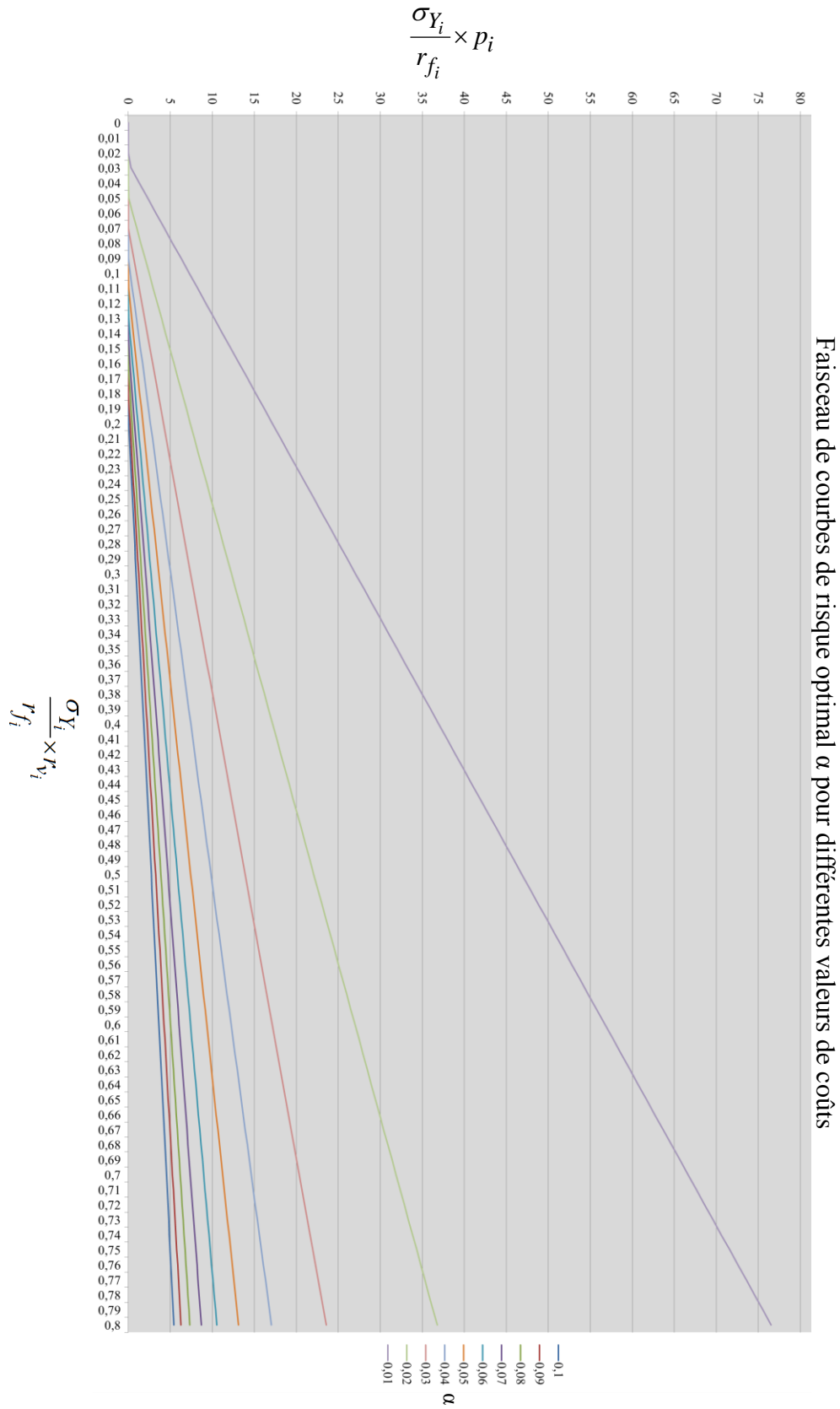
Proposition d'optimisation

Annexe 3 : valeurs de α en cas de nullité coût variable direct des unités approvisionnées en urgence

$\frac{p_i}{r_{f_i}} \times \sigma_{Y_i}$	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,000		0,0001	0,0004	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0021	0,0024	0,0028
0,010	0,0031	0,0035	0,0039	0,0042	0,0046	0,0050	0,0054	0,0058	0,0062	0,0066
0,020	0,0070	0,0074	0,0078	0,0082	0,0086	0,0090	0,0094	0,0098	0,0103	0,0107
0,030	0,0111	0,0115	0,0120	0,0124	0,0128	0,0133	0,0137	0,0142	0,0146	0,0150
0,040	0,0155	0,0159	0,0164	0,0168	0,0173	0,0178	0,0182	0,0187	0,0191	0,0196
0,050	0,0201	0,0205	0,0210	0,0215	0,0220	0,0224	0,0229	0,0234	0,0239	0,0243
0,060	0,0248	0,0253	0,0258	0,0263	0,0267	0,0272	0,0277	0,0283	0,0287	0,0292
0,070	0,0297	0,0302	0,0307	0,0312	0,0317	0,0322	0,0327	0,0333	0,0337	0,0342
0,080	0,0348	0,0352	0,0358	0,0362	0,0368	0,0373	0,0379	0,0384	0,0389	0,0394
0,090	0,0399	0,0404	0,0409	0,0415	0,0420	0,0425	0,0431	0,0435	0,0441	0,0447
0,100	0,0451	0,0457	0,0463	0,0468	0,0474	0,0479	0,0484	0,0490	0,0495	0,0500
0,110	0,0506	0,0511	0,0517	0,0522	0,0527	0,0533	0,0538	0,0544	0,0549	0,0555
0,120	0,0560	0,0566	0,0572	0,0577	0,0582	0,0588	0,0594	0,0600	0,0605	0,0611
0,130	0,0617	0,0621	0,0628	0,0633	0,0639	0,0644	0,0650	0,0655	0,0662	0,0667
0,140	0,0673	0,0678	0,0684	0,0690	0,0696	0,0701	0,0708	0,0713	0,0719	0,0724
0,150	0,0730	0,0737	0,0742	0,0748	0,0754	0,0759	0,0765	0,0771	0,0777	0,0782
0,160	0,0788	0,0794	0,0800	0,0806	0,0812	0,0818	0,0824	0,0830	0,0835	0,0841
0,170	0,0847	0,0853	0,0860	0,0866	0,0871	0,0877	0,0883	0,0890	0,0895	0,0901
0,180	0,0908	0,0913	0,0919	0,0926	0,0931	0,0938	0,0943	0,0949	0,0956	0,0961
0,190	0,0968	0,0973	0,0980	0,0985	0,0992	0,0997	0,1004	0,1010	0,1017	0,1022
0,200	0,1028	0,1035	0,1040	0,1047	0,1053	0,1058	0,1066	0,1071	0,1077	0,1084
0,210	0,1090	0,1095	0,1103	0,1109	0,1114	0,1122	0,1128	0,1133	0,1139	0,1145
0,220	0,1153	0,1158	0,1164	0,1170	0,1176	0,1184	0,1190	0,1196	0,1202	0,1208
0,230	0,1214	0,1220	0,1228	0,1234	0,1240	0,1247	0,1253	0,1259	0,1265	0,1271
0,240	0,1278	0,1284	0,1290	0,1297	0,1303	0,1309	0,1316	0,1322	0,1329	0,1335
0,250	0,1341	0,1348	0,1354	0,1361	0,1368	0,1374	0,1381	0,1385	0,1392	0,1398
0,260	0,1405	0,1412	0,1419	0,1425	0,1432	0,1437	0,1443	0,1450	0,1457	0,1464
0,270	0,1471	0,1475	0,1482	0,1489	0,1496	0,1503	0,1508	0,1515	0,1522	0,1529
0,280	0,1534	0,1541	0,1548	0,1555	0,1560	0,1567	0,1574	0,1582	0,1587	0,1594
0,290	0,1601	0,1606	0,1613	0,1621	0,1626	0,1633	0,1640	0,1645	0,1653	0,1660
0,300	0,1665	0,1673	0,1678	0,1685	0,1693	0,1698	0,1705	0,1713	0,1718	0,1726
0,310	0,1731	0,1739	0,1744	0,1752	0,1759	0,1764	0,1772	0,1777	0,1785	0,1790
0,320	0,1798	0,1804	0,1811	0,1817	0,1825	0,1830	0,1838	0,1843	0,1851	0,1857
0,330	0,1865	0,1870	0,1878	0,1883	0,1892	0,1897	0,1905	0,1911	0,1919	0,1924
0,340	0,1932	0,1938	0,1943	0,1952	0,1957	0,1966	0,1971	0,1979	0,1985	0,1991
0,350	0,1999	0,2005	0,2013	0,2019	0,2024	0,2033	0,2038	0,2044	0,2053	0,2058
0,360	0,2067	0,2073	0,2078	0,2087	0,2093	0,2098	0,2107	0,2113	0,2119	0,2127
0,370	0,2133	0,2139	0,2148	0,2153	0,2159	0,2168	0,2174	0,2180	0,2186	0,2195
0,380	0,2201	0,2206	0,2215	0,2221	0,2227	0,2233	0,2242	0,2248	0,2254	0,2263
0,390	0,2269	0,2275	0,2281	0,2290	0,2296	0,2303	0,2309	0,2315	0,2324	0,2330
0,400	0,2336	0,2342	0,2351	0,2358	0,2364	0,2370	0,2376	0,2385	0,2392	0,2398
0,410	0,2404	0,2410	0,2420	0,2426	0,2432	0,2438	0,2445	0,2451	0,2460	0,2467
0,420	0,2473	0,2479	0,2486	0,2492	0,2502	0,2508	0,2514	0,2521	0,2527	0,2533
0,430	0,2540	0,2549	0,2556	0,2562	0,2569	0,2575	0,2582	0,2588	0,2595	0,2604
0,440	0,2611	0,2617	0,2624	0,2630	0,2637	0,2643	0,2650	0,2657	0,2663	0,2670
0,450	0,2680	0,2686	0,2693	0,2699	0,2706	0,2713	0,2719	0,2726	0,2733	0,2739
0,460	0,2746	0,2753	0,2759	0,2766	0,2773	0,2779	0,2789	0,2796	0,2803	0,2810
0,470	0,2816	0,2823	0,2830	0,2837	0,2843	0,2850	0,2857	0,2864	0,2871	0,2877
0,480	0,2884	0,2891	0,2898	0,2905	0,2912	0,2918	0,2925	0,2932	0,2939	0,2946
0,490	0,2953	0,2960	0,2967	0,2974	0,2981	0,2987	0,2994	0,3001	0,3008	0,3015
0,500	0,3022	0,3029	0,3036	0,3040	0,3047	0,3054	0,3061	0,3068	0,3075	0,3082
0,510	0,3089	0,3096	0,3103	0,3110	0,3117	0,3124	0,3131	0,3138	0,3145	0,3153
0,520	0,3160	0,3163	0,3170	0,3177	0,3185	0,3192	0,3199	0,3206	0,3213	0,3220
0,530	0,3228	0,3235	0,3238	0,3246	0,3253	0,3260	0,3267	0,3274	0,3282	0,3289
0,540	0,3296	0,3303	0,3307	0,3314	0,3321	0,3329	0,3336	0,3343	0,3351	0,3358

$\frac{P_i}{r_{f_i}} \times \sigma_{Y_i}$	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,550	0,3361	0,3369	0,3376	0,3383	0,3391	0,3398	0,3405	0,3413	0,3416	0,3424
0,560	0,3431	0,3438	0,3446	0,3453	0,3457	0,3464	0,3472	0,3479	0,3486	0,3494
0,570	0,3501	0,3505	0,3512	0,3520	0,3527	0,3535	0,3542	0,3546	0,3553	0,3561
0,580	0,3568	0,3576	0,3579	0,3587	0,3594	0,3602	0,3609	0,3617	0,3620	0,3628
0,590	0,3635	0,3643	0,3650	0,3654	0,3662	0,3669	0,3677	0,3684	0,3688	0,3696
0,600	0,3703	0,3711	0,3718	0,3722	0,3730	0,3737	0,3745	0,3749	0,3756	0,3764
0,610	0,3771	0,3779	0,3783	0,3790	0,3798	0,3806	0,3809	0,3817	0,3825	0,3832
0,620	0,3840	0,3844	0,3851	0,3859	0,3867	0,3871	0,3878	0,3886	0,3894	0,3897
0,630	0,3905	0,3913	0,3920	0,3924	0,3932	0,3940	0,3947	0,3951	0,3959	0,3967
0,640	0,3974	0,3978	0,3986	0,3994	0,3997	0,4005	0,4013	0,4021	0,4025	0,4032
0,650	0,4040	0,4048	0,4052	0,4059	0,4067	0,4071	0,4079	0,4087	0,4094	0,4098
0,660	0,4106	0,4114	0,4118	0,4125	0,4133	0,4141	0,4145	0,4153	0,4161	0,4164
0,670	0,4172	0,4180	0,4184	0,4192	0,4200	0,4207	0,4211	0,4219	0,4227	0,4231
0,680	0,4239	0,4247	0,4250	0,4258	0,4266	0,4270	0,4278	0,4286	0,4290	0,4298
0,690	0,4305	0,4309	0,4317	0,4325	0,4329	0,4337	0,4345	0,4353	0,4357	0,4364
0,700	0,4372	0,4376	0,4384	0,4392	0,4396	0,4404	0,4408	0,4416	0,4424	0,4428
0,710	0,4435	0,4443	0,4447	0,4455	0,4463	0,4467	0,4475	0,4483	0,4487	0,4495
0,720	0,4503	0,4507	0,4514	0,4522	0,4526	0,4534	0,4538	0,4546	0,4554	0,4558
0,730	0,4566	0,4574	0,4578	0,4586	0,4594	0,4598	0,4606	0,4610	0,4618	0,4626
0,740	0,4630	0,4637	0,4645	0,4649	0,4657	0,4661	0,4669	0,4677	0,4681	0,4689
0,750	0,4693	0,4701	0,4709	0,4713	0,4721	0,4729	0,4733	0,4741	0,4745	0,4753
0,760	0,4761	0,4765	0,4773	0,4777	0,4785	0,4793	0,4797	0,4805	0,4809	0,4817
0,770	0,4825	0,4829	0,4836	0,4840	0,4848	0,4856	0,4860	0,4868	0,4872	0,4880
0,780	0,4884	0,4892	0,4900	0,4904	0,4912	0,4916	0,4924	0,4932	0,4936	0,4944
0,790	0,4948	0,4956	0,4960	0,4968	0,4976	0,4980	0,4988	0,4992	0,5000	>0,5000

Annexe 4 : valeurs de α en présence d'un coût fixe et d'un coût variable direct d'approvisionnement en urgence



RÉSUMÉ ET MOTS CLÉS

Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés

Résumé : Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au mode d'exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont dans un contexte de production de masse de produits fortement diversifiés et de dispersion géographique des unités de production. Lorsque l'information prévisionnelle est mal exploitée, des phénomènes, similaires à l'effet coup de fouet connu en chaîne logistique aval, apparaissent en chaîne logistique amont altérant durablement sa performance. Dans le but de contrer certains des mécanismes à l'origine de ces phénomènes, nous avons proposé une adaptation de la MRP permettant d'exploiter au mieux l'information prévisionnelle. L'adaptation de la MRP repose sur une méthode de calcul des besoins basée sur l'exploitation statistique des nomenclatures de planification et la diffusion d'informations sur les niveaux de recombplètement le long de la chaîne logistique amont. Cette approche a été testée avec succès sur plusieurs cas d'application dans l'industrie automobile.

Mots clés : gestion de la chaîne logistique, gestion des approvisionnements, MRP, production diversifiée, effet coup de fouet, partage d'informations, nomenclatures de planification.

The use of the demand forecast for managing the upstream flows of a supply chain dedicated to the mass production of highly diversified products

Abstract: In this PhD dissertation, we investigated the way of exploiting the demand forecasts for the upstream flow management in a context of mass production of highly diverse products and of geographical dispersion of the production units. When the forecasts are poorly exploited, phenomena similar to the well-known bullwhip effect in the downstream supply chain appear in the upstream supply chain altering permanently its performances. In order to counter some of the mechanisms underlying these phenomena, we proposed an adaptation of the MRP to perform the exploitation of the forecasted demand. The adaptation of the MRP is based on a calculation method that uses the planning BOM for calculating and transmitting replenishment levels along the upstream supply chain. This approach has been successfully tested on several application studies in the automotive industry.

Keywords: supply chain management, MRP, diversified production, information sharing, bullwhip effect, planning BOM.