

EXPERIMENTATION D'UN MODELE DE CONCEPTION D'UNE FAMILLE DE PRODUITS ET DE SA CHAÎNE LOGISTIQUE

J. LAMOTHE, A. BONNAFE, M. GORGAS, L. DUPONT, M. ALDANONDO

Centre de Génie Industriel, Ecole des Mines d'Albi Carmaux

Campus Jarlard, Route de Teillet, 81013 ALBI Cedex 09

bonnafe@enstimac.fr, lamothe@enstimac.fr, dupont@enstimac.fr, aldanondo@enstimac.fr, mariagorgas@hotmail.com

RESUME : Des secteurs majeurs comme l'automobile, l'aéronautique ou l'électronique tendent à la personnalisation de masse des produits et à une internationalisation des marchés et de la production. Cette évolution amène les industriels à maîtriser, dès la conception, la diversité des produits et à optimiser la chaîne logistique les fournissant.

Cette communication repart d'un modèle existant d'optimisation linéaire en variables mixtes intégrant ces deux dimensions et présente une expérimentation faite sur celui-ci : l'optimum proposé est un compromis entre des coûts d'existence d'articles dits « packs », des coûts de sur-qualité pour satisfaire la demande et des coûts logistiques liés la localisation des sites de production et l'allocation des charges de production.

Pour étudier l'effet de divers paramètres, un cas d'étude réaliste a été construit. Il correspond à la fourniture à un constructeur automobile d'une famille d'équipements embarqués constitués de câblages et de calculateurs. Pour le cas étudié, l'étude de l'effet des paramètres sur les résultats du modèle d'optimisation montre le rôle important d'un paramètre lié au volume des stocks de sécurité qu'il faut dimensionner en fonction de la diversité : nous proposons une abaque liant diversité, stock de sécurité, schéma logistique, coût des équipements pour aider à faire ce paramétrage.

MOTS-CLES : conception de chaîne logistique, méthode d'optimisation, étude de cas

1. INTRODUCTION

Le vocable de personnalisation de masse des produits (« mass customization ») a vocation à rendre compte de la situation des entreprises qui :

- sont engagées sur des marchés de masse;
- ont des exigences croissantes de personnalisation des produits proposés aux clients ;
- et doivent gérer une croissance exponentielle du nombre de variantes d'un produit en vente.

Par ailleurs, l'efficacité d'une conception simultanée des produits et des procédés de fabrication a été identifiée depuis au moins la fin des années 70. Ce constat a donné naissance à de nombreuses techniques de conception simultanée dites « design for X ». Le champ s'est ainsi étendu depuis à l'ensemble de la chaîne logistique (« design for supply chain »).

Par suite, se pose aujourd'hui le problème de la conception simultanée d'une famille de produits, des procédés de fabrication et de la chaîne logistique associés. (Rungtusanathan et Forza, 2005) considèrent que trois questions centrales se posent :

1/ Pourquoi est-il opportun de coordonner ces décisions de conception ?

2/ Quels sont les mécanismes susceptibles de permettre une telle coordination ?

3/ Quels sont les enjeux de cette coordination en terme de performances de l'entreprise ?

Adressant plus particulièrement la 1^{ère} question du « pourquoi ? », (Thirumalai et Sinha, 2005) montrent sur la base de données marketing que la performance d'une fonction de distribution varie selon la nature des produits distribués. De même, (Fine *et al.*, 2005) re-

marquent la performance de constructeurs automobiles ayant aligné leur stratégie d'architecture produit avec une stratégie logistique. A l'opposé, (Forza *et al.*, 2005) soulignent que coupler de façon volontariste les trois processus de conception produit, procédé et chaîne logistique est susceptible de provoquer des dégradations de la fiabilité et de qualité de processus de conception jusque là plus indépendants et autonomes.

Pour la 2^{ème} question, (Salvador *et al.*, 2002) proposent une classification de la diversité produits et préconisent pour chaque cas des configurations particulières des chaînes logistiques. En fonction du ratio entre le nombre de variantes possibles d'une famille de produits et la quantité totale fabriquée, ils distinguent ainsi la personnalisation de masse « molle » (ratio < 1/1000) de la personnalisation de masse « dure » (ratio > 1/10).

(Fixson, 2005) place l'« architecture du produit » au centre du raisonnement et propose un cadre d'évaluation de l'architecture produit, qui considère :

- le nombre de fonctions réalisées par un composant ;
- le nombre de composants pour une fonction ;
- le niveau d'exigence aux interfaces entre composants, en espace, énergie, matériaux et information ;
- la « réversibilité » des interfaces, qui caractérise la facilité à déconnecter et remplacer un composant.

Pour la 3^{ème} question, (Huang *et al.*, 2005) proposent un algorithme génétique permettant de sélectionner des variantes produits dans une nomenclature générique et d'optimiser le coût total de fonctionnement d'une chaîne logistique déjà définie.

(Su *et al.*, 2005) comparent les techniques de différenciation retardée pour la personnalisation de masse :

- dans la « Time postponement » (TP), la différenciation du produit se fait après réception de la commande client. La TP réduit les stocks de sécurité mais suppose que les clients acceptent le délai nécessaire à cette différenciation.
- dans la « Form postponement » (FP), la différenciation du produit est repoussée sur les derniers maillons de la chaîne logistique permettant une réduction des stocks en amont.

(Fine *et al.*, 2005) proposent une approche de type « weighted goal programming » pour sélectionner une « configuration » (couple famille produit / gamme d'assemblage) et un réseau de fournisseurs en satisfaisant des critères : qualité, coûts, temps de cycle, continuité des partenariats et dépendance aux fournisseurs.

(Agard *et al.* 2006) propose une méthodologie pour constituer des familles de modules optimisant le respect de contraintes d'assemblage en flux synchrone, de couverture de la demande, et les coûts de gestion des modules.

Enfin, (Hadj-Hamou, 2003) et (Lamothe et al, 2006) proposent de représenter l'ensemble des choix de conception d'une famille de produits dans une nomenclature générique et de même les choix d'implantation et de type de procédé de fabrication dans un réseau logistique générique. Un modèle de programmation linéaire en variables mixtes est ensuite proposé pour optimiser simultanément ces choix.

Ce dernier modèle n'a été expérimenté que sur de petits cas isolés (peu de segments de marché). Nous construisons ici une étude de cas plus importante basée sur un scénario réaliste. Notre objectif est d'analyser, sur ce cas, quels sont les paramètres dont l'évolution amène à modifier simultanément la conception de la famille produit et la conception de la chaîne logistique. La partie 2 rappelle les éléments du modèle de (Hadj-hamou, 2003) repris ici. La partie 3 détaille le cas d'étude et les hypothèses associées.

La partie 4 donne les résultats des diverses expérimentations. Ce travail, initié dans le cadre d'un stage de master de recherche (Bonnafé, 2006), fait apparaître le besoin de rendre dépendants deux paramètres : le dimensionnement des stocks de sécurité et la diversité produit. Nous proposons donc de construire, en partie 4.2, une abaque pour aider à faire ce réglage.

2. PROBLEME ET MODELISATION

2.1. Problème

On se place ici dans la perspective du cas qui sera décrit au chapitre suivant. L'industriel est un équipementier automobile, qui répond à l'appel d'offres d'un constructeur, pour toute la période de production d'un nouveau modèle (3 à 5 ans). Le problème se situe au niveau de la planification stratégique. Le produit à fournir est un système électrique embarqué, monté à partir de composants passifs (câblages) et de composants actifs (calculateurs).

Le problème industriel conduit à modéliser :

- Une nomenclature générique qui exprime les choix de conception de produits autorisés pour couvrir les segments de marché de la demande (Figure 1);
- Un réseau logistique générique qui décrit les types d'installations, leur localisation possibles et les flux possibles entre ces installations (Figure 2).

La notion de nomenclature générique ou GBOM (Hegge et Wortmann, 1991) permet de définir implicitement ou explicitement toutes les variantes possibles d'un produit. Nous reprenons ici la version explicite et y ajoutons des nœuds (dits de type OU) pour traduire les possibilités de substitution par sur-équipement. Notre GBOM distingue deux types d'articles :

- des articles logiques ou fantômes (demande, segments) jamais fabriqués, stockés ni transportés ;
- des articles physiques (packs, pièces) qui peuvent être fabriqués, stockés et transportés.

Ces articles peuvent être reliés par des liens de nomenclature de type ET (si le père existe, tous les fils doivent exister pour le réaliser) ou de type OU exclusif (si le père existe, un seul des fils, à choisir, le réalisera). Une nomenclature générique décrit ainsi la décomposition de la demande totale sur un marché, déclinée en segments de marché. Satisfaire la demande exige de satisfaire tous les segments « fils » (noeud en ET). Dans la figure 1, pour chaque segment (noeud en OU), on décrit quels sont les packs susceptibles de le satisfaire fonctionnellement (strictement ou par suréquipement). Puis, pour chaque pack (noeud en ET), on décrit la liste des pièces nécessaires à son montage.

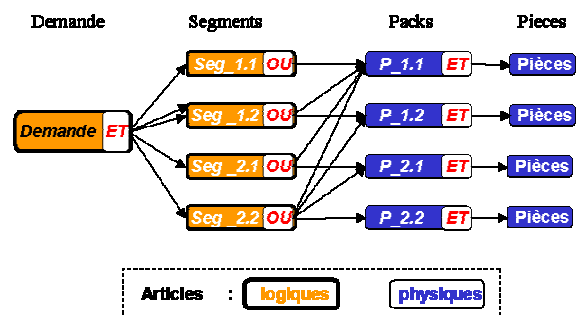


Figure 1 : une nomenclature générique (GBOM)

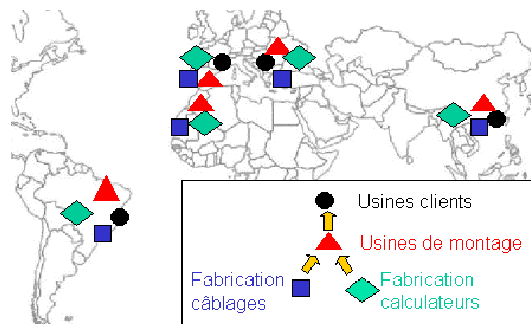


Figure 2 : un réseau logistique générique

L'instanciation de la nomenclature générique nécessite une optimisation entre les coûts d'existence et de gestion de packs, et de sur-équipement des segments.

L'instanciation du réseau logistique générique conduit à un problème de localisation des sites et d'allocation des productions aux sites ouverts.

La description précise des conditions techniques, économiques et géographiques de fabrication des pièces et de montage des sous-ensembles permet de modéliser le couplage entre les deux approches, et autorise l'optimisation simultanée de la conception des produits et de la chaîne logistique.

2.2. Modèle

Nous faisons ici quelques hypothèses simplificatrices sur le modèle initial de (Hadj Hamou 2003, Lamothe et al 2006), qui facilitent l'exposé du modèle sans modifier les principes de l'analyse effectuée par la suite :

- La structure de la nomenclature générique est en 4 niveaux comme explicité au §2.1 et à la figure 1.
- Les articles « pack » sont produits dans des sites d'assemblage. Les « pièces » sont fabriquées dans des usines adaptées (câblage, calculateur).
- Le modèle est mono-période sans limite de capacité (pas d'effet d'échelle).
- Initialement, aucun site n'existe. Tous les sites ont un coût d'ouverture et aucun coût de fermeture.
- Entre 2 sites, un seul lien de transport existe (combinant au besoin plusieurs modes de transport).

On utilisera les ensembles et les notations suivants :

	Ensembles	Cardinaux	Indices
Usines du client	Uc	$NbUc$ ou $ Uc $	uc
Usines de montage	Um	$NbUm$ ou $ Um $	um
Usines de fabrication	Uf	$NbUf$ ou $ Uf $	uf
Segments de la demande	Sg	$NbSg$ ou $ Sg $	sg
Packs	Pk	$NbPk$ ou $ Pk $	pk
Pièces	Pc	$NbPc$ ou $ Pc $	pc

Tableau 1 : Ensembles et notations utilisés

2.2.1. Données

$DmUcSg(uc,sg)$: demande du segment sg à l'usine uc .
 $BomPkSg(pk,sg)$: 1 si segment sg est un père du pack pk dans la nomenclature générique.
 $CoPk(pk)$ est le coût fixe d'existence d'un pack pk .
 $BomPkPc(pk,pc)$: quantité de pièces pc dans un pack pk .
 $BomPk(pk)$: liste des pièces composant pk
 $CoUm(um)$: coût fixe d'ouverture du site um .
 $CoUf(uf)$: coût fixe d'ouverture du site uf .
 $CtPkUm(pk,um)$: coût variable unitaire de montage d'un pack pk dans l'usine de montage um ;
 $CtUfPc(uf,pc)$: coût variable unitaire de fabrication d'une pièce pc dans l'usine de fabrication uf ;
 $CtUcUm(uc,um,pk)$ est le coût variable unitaire de transport d'un pack pk entre l'usine de montage um et l'usine cliente uc .

$CtUfUm(uf,um,pc)$ est le coût variable unitaire de transport d'une pièce pc de l'usine de fabrication uf au montage um .

K (=1 par défaut) est un coefficient de pondération des coûts de stockage dans les coûts de transport.

2.2.2. Variables

$BPk(pk)$: binaire qui vaut 1 ssi le pack pk est créé.
 $BPkSg(pk,sg)$: binaire qui vaut 1 ssi le segment sg est servi par le pack pk .
 $BUm(um)$: binaire valant 1 ssi l'usine um est ouverte.
 $BUf(uf)$ binaire qui vaut 1 ssi l'usine uf est ouverte.
 $XPkUm(pk,um)$ quantité de packs pk faits à l'usine um .
 $XUfPc(uf,pc)$ quantité de pièces pc faites à l'usine uf .
 $ZUcUmPk(uc,um,pk)$ quantité de packs pk transportés de l'usine de montage um à l'usine cliente uc .
 $ZUfUmPc(uf,um,pc)$ quantité de pièces pc transportées de l'usine de fabrication uf à celle de montage um .

2.3. Fonction objectif

L'objectif est de minimiser la somme des coûts nécessaires à la satisfaction de la demande de toutes les usines clientes. Soit, minimiser :

$$CT = \text{coûts d'existence des packs} \\ \sum_{pk} CoPk(pk) \cdot BPk(pk)$$

+ coûts d'ouverture de sites

$$\sum_{um} CoUm(um) \cdot BUm(um) + \sum_{uf} CoUf(uf) \cdot BUf(uf)$$

+ coûts variables de montage et fabrication

$$\sum_{pk} \sum_{um} CpPkUm(pk,um) \cdot XPkUm(pk,um) \\ + \sum_{uf} \sum_{pc} CpUfPc(uf,pc) \cdot XUfPc(uf,pc)$$

+ coûts variables de transport des packs

$$\sum_{uc} \sum_{um} \sum_{pk} CtUcUm(uc,um,pk) \cdot ZUcUm(uc,um,pk)$$

+ coûts de transport des pièces

$$\sum_{uf} \sum_{um} \sum_{pc} CtUfUm(uf,um,pc) \cdot ZUfUmPc(uf,um,pc)$$

2.4. Contraintes

Un lien de nomenclature segment - pack peut exister, si ce pack est fils de ce segment dans la nomenclature :

$$\forall sg \in Sg \quad \forall pk \in Pk \quad BPkSg(pk,sg) \leq BomPkSg(pk,sg) \quad (1)$$

Un pack fournit chaque segment à demande non nulle :

$$\forall sg \in Sg, \quad \sum_{pk} BPkSg(pk,sg) = 1 \quad (2)$$

Un pack créé est produit en quantité non nulle :

$$\forall pk \in Pk \quad BPk(pk) \leq \sum_{um} XPkUm(pk,um) \quad (3)$$

Pour qu'un pack soit fils d'au moins l'un quelconque des segments, il est nécessaire que ce pack soit ouvert :

$$\forall pk \in Pk \sum_{sg}^{Sg} BPkSG(pk,sg) \leq NbSg \cdot BPk(pk) \quad (4)$$

Un site de fabrication doit être ouvert pour produire :

$$\forall uf \in Uf \sum_{pc}^{Pc} XUfPc(uf,pc) \leq Infini \cdot BUf(uf) \quad (5)$$

Un site de montage doit être ouvert pour produire :

$$\forall um \in Um \sum_{pk}^{Pk} XPkUm(pk,um) \leq Infini \cdot BUM(um) \quad (6)$$

Il faut des sites de fabrication et montage :

$$\sum_{uf}^{Uf} BUf(uf) \geq 1 \text{ et } \sum_{um}^{Um} BUM(um) \geq 1 \quad (7)$$

La quantité transportée d'un pack vers un site est la quantité nécessaire pour y satisfaire tous les segments :

$$\forall pk \in Pk, \forall uc \in Uc, \quad (8)$$

$$\sum_{um}^{Um} ZUcUmPk(uc,um,pk) = \sum_{sg}^{Sg} DmUcSg(uc,sg) \cdot BPkSg(pk,sg)$$

La quantité transportée d'une pièce vers un site est la quantité nécessaire pour y monter les packs :

$$\forall pc \in Pc, \forall um \in Um, \quad (9)$$

$$\sum_{uf}^{Uf} ZUfUmPc(uf,um,pc) = \sum_{pk}^{Pk} XPkUm(pk,um) \cdot BomPkPc(pk,pc)$$

Tous les packs produits dans une usine de montage doivent être transportés vers les usines clients :

$$\forall pk \in Pk, \forall um \in Um, \sum_{uc}^{Uc} ZUcUmPk(uc,um,pk) = XPkUm(pk,um) \quad (10)$$

Toutes les pièces produites dans une usine de fabrication doivent être transportées vers le montage :

$$\forall pc \in Pc, \forall uf \in Uf, \sum_{um}^{Um} ZUfUmPc(uf,um,pc) = XUfPc(uf,pc) \quad (11)$$

3. UN CAS D'ETUDE

3.1. Les hypothèses du cas d'étude

Pour réaliser l'expérimentation du modèle, il a été nécessaire de construire un cas d'étude le plus réaliste possible, s'apparentant au secteur choisi (l'automobile). Nous sommes repartis des interviews de caractérisation du cas industriel réalisés pour la thèse (Hadj-Hamou, 2003) et avons cherché à accroître les dimensions de la nomenclature générique (nombre de fonctions), à tester la sensibilité à des paramètres de caractérisation de la demande (dépendance entre fonctions, centrage de la demande sur le marché tels que définis au 3.2). Nous proposons ainsi un jeu de données, appelé cas central.

Le réseau logistique générique est celui évoqué sur la Figure 2 avec 5 zones d'implantation envisagées : 4 au plus près des implantations clients (France, Hongrie, Chine, Brésil) et une dans une zone à bas coût proche de l'Europe (Maroc). Dans chaque zone, 3 types

d'usine peuvent être ouverts : montage, fabrication de câblage, fabrication de calculateurs.

Pour définir la nomenclature générique, nous considérons que la demande du marché s'exprime sur un ensemble de fonctions, $f \in F$, chacune susceptible d'être décrite en 3 niveaux de service ordonnés (bas < moyen < haut). On dira qu'un segment S2 est supérieur à un segment S1, ssi, pour toute fonction, le niveau de service de S2 est supérieur au niveau de service de S1.

A chaque segment de marché, on propose l'existence d'un pack qui répond exactement au besoin de ce segment. Dans ce pack, à chaque fonction f correspond un montage de 3 composants :

- un toron électrique T_f standard à tous les niveaux de service de la fonction ;
- un câblage $Cab_{f,n}$ et un calculateur $Cal_{f,n}$ spécifiques à chaque niveau de service n ;

Pour réduire la diversité des packs à gérer, il est possible de faire du suréquipement en fournissant un segment de marché par un pack fonctionnellement supérieur. Dans la figure 1, les liens entre segments et pack modélisent ceci en considérant 2 fonctions à 2 niveaux de fonctionnalité.

Dans le cas présent, nous avons fait le choix de modéliser la diversité des segments de demande par 3 fonctions A, B et C en ajoutant les hypothèses suivantes :

- La fonction A n'utilise pas de calculateur.
- La fonction C n'utilise pas de câblage.
- La fonction B utilise un toron, des câblages et des calculateurs.

Ainsi

$$Sg = \{(A = a, B = b, C = c) \mid a, b, c \in \{bas, moyen, haut\}\},$$

$$Pk = \{(A = p, B = q, C = r) \mid p, q, r \in \{bas, moyen, haut\}\} \text{ et}$$

$BomPkSg((p,q,r),(a,b,c)) = 1$ ssi $p \geq a, q \geq b, r \geq c$ et 0 sinon. Il existe donc 27 packs possibles pour lesquels un choix d'existence doit être effectué.

3.2. Le modèle de coûts

Le coût variable d'une pièce (toron, câblage ou calculateur) est composé d'un coût d'achat de matière première considéré comme indépendant de la localisation, et de coûts de main d'œuvre dépendants de la localisation. Par ailleurs, le coût d'ouverture d'une usine comprend des coûts d'investissements indépendants de la localisation, et des coûts d'implantation indexés sur le niveau local du coût de la main d'oeuvre.

Pour construire le modèle de coût, la nature des articles fait que les constatations suivantes peuvent être tirées :

- Les torons et câblages sont à produire dans des sites de fabrication de câblage. Ils demandent une charge de main d'oeuvre importante et des investissements matériels faibles (tables et carrousels).
- la fabrication de calculateurs exige des investissements technologiques élevés sous forme de lignes

automatisées, et fait appel à une main d'oeuvre peu nombreuse mais très qualifiée. Les coûts d'investissement, indépendants de la localisation, sont majoritaires par rapport aux coûts locaux d'implantation.

- Dans sa structure de coûts, le montage des packs s'apparente à une activité de fabrication de câblage avec une charge de main d'oeuvre importante et des investissements matériels faibles (tables et carrousels).

Sur ces principes les Tableau 2 et Tableau 3 résument les éléments de coûts considérés en considérant une base 100 pour le niveau de vie du pays. Deux types de taux apparaissent :

- T_{xMO} est le pourcentage d'un coût variable ou d'existence qui dépend de la main d'oeuvre et doit donc être indexé sur le niveau de salaire d'un pays.
- T_{xbmh} est le taux de progression du cout d'une pièce pour passer du niveau « bas » au niveau « moyen », ou du niveau « moyen » au niveau « haut ».

Coûts (€)	Fonction, niveau			T_{xMO}	T_{xbmh}
	A, bas	B, bas	C, bas		
Câblage	30	15	X	70%	1,1
Calculateur	X	100	200	10%	1,1
Toron	50	50	50	70%	
Montage d'1 pack	50			60%	

Tableau 2 : coûts variables unitaire (base 100 USA)

	Coût (€)	T_{xMO}
Site Montage	10^6	40 %
Site Câblage	5.10^5	60 %
Site calculateur	$2,5.10^7$	20 %
Unitaire par Pack	2.10^4	

Tableau 3 : coût d'existence des sites et packs (base 100 pour les USA)

Les statistiques 2004 du U.S. Department of Labor (U.S.D.L., 2005), fournies au Tableau 4, donnent par ailleurs des indices de coûts de main d'oeuvre par pays.

Pays	Indice du coût horaire manufacturier
France	103
Hongrie	25
Maroc	25
Brésil	13
Chine	10

Tableau 4 : coûts de main d'oeuvre (base 100 USA)

Par exemple, le coût unitaire de fabrication du calculateur de niveau moyen pour la fonction B dépend du taux de progression T_{xbmh} , du taux de main d'oeuvre T_{xMO} , du cout de fabrication du calculateur de niveau bas, et de l'indice de coût horaire du Brésil :

$$CtUfPc(Cal_{B,moyen}, Bresil) = 1,1 \times 100 \times [0,1 \times (0,13) + 0,9]$$

Les coûts unitaires de transport intègrent le coût de déplacement des produits et les coûts de stockage.

Les modes de transport utilisés varient selon les distances entre sites. Le transport par air est très exceptionnel car son coût est élevé rapporté à la valeur des marchandises transportées. Les transports inter-continentaux se font en containers par bateau avec une fréquence faible (au mieux un tous les quinze jours ou tous les mois suivant les destinations). Les transports intra-continentaux se font par route ou par fer, avec des fréquences plus importantes (hebdomadaires ou journalières).

km	France	Hongrie	Maroc	Brésil	Chine
France	0	1220	1940	9300	9260
Hongrie	1220	0	2700	10200	8340
Maroc	1940	2700	0	8000	11100
Brésil	9300	10200	8000	0	18230
Chine	9260	8340	11100	18230	0

Tableau 5 : $D(u1,u2)$, Distances par air entre pays (km)

Des cotations ont été obtenues auprès d'un professionnel de la logistique sous diverses hypothèses. Il en ressort que le coût unitaire de transport est de l'ordre de 0,04€ pour 1000 kms pour une pièce (câblage ou calculateur) et de 0,16€ pour un pack.

Les délais propres à chaque mode de transport ont d'autres conséquences. Plus les délais de transports sont longs et plus le constructeur exige d'avoir des garanties en terme de couverture de stock, d'où accroissement des stocks de sécurité. Plus les fréquences sont faibles, plus les tailles de lots et les stocks de rotation augmentent.

Enfin, une référence a une durée de vie courte : le constructeur souhaite régulièrement modifier une référence de pièce ou de pack. Lorsqu'une référence arrive en fin de vie, on a le choix entre écouler le stock ou jeter les produits. La réalité du marché ne permet pas à un constructeur d'attendre longtemps que le stock s'écoule. En général, les stocks sont abandonnés et les coûts d'obsolescence sont supportés par l'équipementier.

Pour intégrer ces coûts complémentaires on calcule un coût unitaire de détention de stocks $CUD(u1,u2,p)$:

$$CUD(u1,u2,p) = Pcent(u1,u2).Rot(u1,u2).CpmU(u1,p) \quad (12)$$

- $Pcent(u1,u2)$ est le pourcentage de la valeur de la marchandise, qui est dépensé lorsque celle-ci est immobilisée pendant une période d'un an dans un stock entre les usines $u1$ et $u2$. Ce pourcentage sera de l'ordre de 20 % pour de l'intracontinental et de 35 % pour l'intercontinental.
- $Rot(u1,u2)$ représente une immobilisation de produit entre les usines $u1$ et $u2$, exprimée en fraction des flux sur une année. Premièrement elle dépend de la fréquence de rotation des transports. Typiquement, elle varie de 1/52 à 2/52 sur l'intracontinental à 1/12 sur l'intercontinental. Deuxièmement, le constructeur client va demander

des stock de sécurité proportionnels au temps de transport (de l'ordre de 50 % ici). Ceci conduit à retenir pour $Rot(u1,u2)$ des valeurs de 1,5/52 à 1,5/12 (Tableau 7).

- $CpmU(u1,p)$ est la valeur totale contenue dans le produit p transporté. Pour une pièce, il correspond à son coût de fabrication qui intègre les coûts d'achats. Pour un pack pk , il comprend le coût unitaire de montage $CpUmPk(um, pk)$ mais aussi les coûts de fabrication et de transport des pièces assemblées pour réaliser le pack pk , le coût des matières premières incluses dans ces pièces ainsi éventuellement que des frais généraux. Devant la nécessité de simplifier l'approche, pour un pack, on retiendra pour $CpmU(u1, pk)$ la valeur moyenne du coût de montage de pk dans l'usine $u1$ plus la valeur moyenne du coût de fabrication des pièces le composant. Soit :

$$CpmU(um, pk) = CpPkUm(pk, um) + \frac{1}{NbUf} \cdot \sum_{pc}^{RBomPK(pk)} \sum_{Uf} CpUfPc(Uf, pc) \quad (13)$$

D'où les coûts unitaire de transport :

$$CtUfUm(u1, um, pc) = \frac{0,04}{1000} D(u1, um) + K \cdot CDU(u1, um, pc) \quad (14)$$

$$CtUcUm(uc, um, pk) = \frac{0,16}{1000} D(uc, um) + K \cdot CDU(uc, um, pk) \quad (15)$$

Il faut noter dans les équations (14) et (15) le rôle du coefficient K qui permet d'augmenter de manière uniforme les coûts de stockage. K peut être vu comme un nombre de temps de cycle de transport que l'on souhaite avoir en stock. Nous l'utiliserons pour analyser l'impact d'une augmentation des stocks. Le Tableau 6 et le Tableau 7 donnent les coefficients de détention et de rotation de stock utilisés.

	France	Hongrie	Maroc	Brésil	Chine
France	10%	20%	20%	35%	35%
Hongrie	20%	10%	20%	35%	35%
Maroc	20%	20%	10%	35%	35%
Brésil	35%	35%	35%	10%	35%
Chine	35%	35%	35%	35%	10%

Tableau 6 : Pourcentage de détention entre zones

	France	Hongrie	Maroc	Brésil	Chine
France	1,5 / 52	3 / 52	3 / 52	1,5/12	1,5/12
Hongrie	3 / 52	1,5 / 52	3 / 52	1,5/12	1,5/12
Maroc	3 / 52	3 / 52	1,5 / 52	1,5/12	1,5/12
Brésil	1,5/12	1,5/12	1,5/12	1,5 / 52	1,5/12
Chine	1,5/12	1,5/12	1,5/12	1,5/12	1,5 / 52

Tableau 7 : coefficient de rotation de stock entre zones

3.3. Structure de la demande

Pour caractériser la demande du marché nous nous intéressons à plusieurs phénomènes :

- La répartition géographique de la demande
- L'existence d'une corrélation entre les niveaux de services souhaités pour les diverses fonctions.

- Le décentrage du marché qui donne, pour une fonction, la probabilité des différents niveaux de service.

Le Tableau 8 donne la répartition géographique globale de la demande par pays.

France	Hongrie	Brésil	Chine
$4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$

Tableau 8 : répartition de la demande entre les zones

Nous modélisons la dépendance entre fonctions par une probabilité conditionnelle. Par souci de simplifications nous n'avons considéré que des dépendances entre 2 fonctions, mais qui peuvent s'enchaîner. Le Tableau 9 donne les probabilités conditionnelles considérées. Nous distinguons ainsi 4 cas de dépendance pour calculer la probabilité de la demande sur un segment de marché :

- Dépendance croissante : $P(Sg(a, b, c)) = P(A = a) \cdot P(B = b / A = a) \cdot P(C = c / B = b)$
- Dépendance décroissante : $P(Sg(a, b, c)) = P(C = c) \cdot P(B = b / C = c) \cdot P(A = a / B = b)$
- Dépendance spirale : $P(Sg(a, b, c)) = P(A = a) \cdot P(C = c / A = a) \cdot P(B = b / C = c)$
- indépendance : $P(Sg(a, b, c)) = P(A = a) \cdot P(C = c) \cdot P(B = b)$

P(X=x/Y=y)	Y=bas	Y=moyen	Y=haut
X=bas	α	β	$1-\alpha-\beta$
X=moyen	β	$1-2 \cdot \beta$	β
X=haut	$1-\alpha-\beta$	β	α

Tableau 9 : probabilités conditionnelles entre 2 fonctions par défaut $\alpha=0,8$ et $\beta=0,15$

De même pour caractériser le décentrage du marché, nous considérons 3 situations (Tableau 10).

Centrage du marché	P(bas)	P(moyen)	P(haut)
Haut de gamme	0,1	0,3	0,6
Moyenne gamme	0,2	0,6	0,2
Bas de gamme	0,6	0,3	0,1

Tableau 10 : probabilités d'une fonction indépendante en fonction du centrage du marché

4. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION

Le modèle proposé a implémenté sous OPL Studio 3.7. Nous présentons par la suite, le résultat de quelques expérimentations.

Ces expérimentations visent à tester successivement les effets de différentes valeurs d'un des paramètres du modèle, les autres restant inchangés. Nous faisons ainsi une suite d'analyses univariées (pour différents paramètres) et non pas une analyse de sensibilité.

Nous appelons « schéma logistique », le choix d'ouverture des usines et l'allocation des flux de pièces (câblages et calculateurs) et de packs qui y correspond. Il est à noter que 5 schéma logistiques (Log 0 à Log 4) sont apparus au cours de cette étude et sont représentés sur la Figure 4. Nous expliquons par la suite, les condi-

tions de paramétrages qui induisent des changements de schéma logistique.

4.1. analyse autour du résultat central

Nous appelons « résultat central », les résultats du modèle d'optimisation pour les 12 scénarios de demande (4 types de dépendance de la demande * 3 types de centrage du marché) sans modifier les données de paramétrage des coûts. Par analyse « autour » du résultat central, nous considérons l'impact d'une variation d'un type de paramètre, les autres restant stables.

Pour les 12 scénarios de la demande, le schéma logistique obtenu est le même et correspond au schéma « log 0 » dans la Figure 4. Ceci n'évolue pas même si l'on augmente la proportion du marché européen par rapport aux autres marchés (+40%). De même dans les analyses qui seront faites par la suite dans ce paragraphe, les conditions de changement de schéma logistique seront pratiquement¹ les mêmes pour les 12 scénarios de la demande (voir Tableaux 11, 12 et 13). Ceci prouve la robustesse du schéma logistique par rapport à la structure de la demande (dépendance entre fonctions, centrage du marché).

Le schéma « Log 0 » correspond à une logistique fortement délocalisée dans laquelle la chine fournit les marchés européens et chinois en packs dont les pièces sont manufacturées en chine. Le Brésil résiste à la pression manufacturière chinoise du fait d'une faible différence dans les coûts de main d'œuvre.

Coût existence pack	Nombre de packs créés (moyenne gamme)			
	Dép. croissante	Dép. décroissante	Dép. spirale	Indépendants
$2 \cdot 10^4$	27	27	27	27
$7 \cdot 10^4$	21	18	21	24
$7,5 \cdot 10^4$	19	18	19	25
$3 \cdot 10^5$	14	14	14	18
$5 \cdot 10^5$	11	10	11	14
$1,8 \cdot 10^6$	9	9	9	10
$2,5 \cdot 10^6$	7	8	9	8
$2 \cdot 10^8$	2	2	2	1
$7 \cdot 10^8$	1	1	1	1

Tableau 11 : impact du coût d'existence de packs

Les 27 ($=3^3$) packs possibles existent dans le résultat central. Pour commencer à ne pas créer certains packs, il faut multiplier le coût d'existence des packs par 3. Dans ce cas, le choix des packs créés dépend du scénario de la demande. Mais le schéma logistique reste toujours Log 0.

¹ Pour des réglages des paramètres proches des conditions de bascule de schéma logistique, le paramétrage de l'outil d'optimisation (tolérances, précision, stratégie de résolution du MIP) influe fortement sur le schéma logistique retenu. Par suite, nous n'avons pas cherché à connaître avec une grande précision, les réglages de paramètres induisant un changement de schéma logistique.

	$\alpha=0,6$ $\beta=0,2$		$\alpha=0,5$ $\beta=0,4$		$\alpha=0,9$ $\beta=0,05$	
	(€/pk)	ΣBPk	(€/pk)	ΣBPk	(€/pk)	ΣBPk
Croissante	395	27	393	27	386	19
Décroissante	386	27	386	27	383	19
Spirale	392	27	392	27	385	19

Tableau 12 : effet des probabilités conditionnelles

France	Brésil	Hongrie	Chine	Coût moyen (€/pack)	Nb packs Créés
croissante	spirale	décroissante	indépendants	390	26
indépendants	décroissante	croissante	spirale	392	27
spirale	croissante	indépendants	décroissante	390	26
décroissante	indépendants	spirale	croissante	390	26

Tableau 13 : marchés avec des dépendances différentes

existence	Ouverture usine		Fabrication		transport	
packs	pièce	pack	pièce	pack	pièce	pack
0,01	0,53	0,03	91,9	5,93	0,26	1,34

Tableau 14 : pourcentage des différents types de coûts

Dans le résultat central, les coûts de transport et stockage représentent moins de 2 % du coût total de la chaîne logistique (Tableau 14).

En multipliant le coût de transport par 13, le schéma logistique passe par le Maroc (« log3 ») sans impact sur la diversité. Par contre, une augmentation seulement de 30 % des coûts de stockage ($K = 1,3$ dans (14) et (15)) suffit pour basculer sur un schéma logistique européen « log 1 » mais toujours sans impact sur la diversité.

Au final, nous retenons de cette étude sur le résultat central :

- l'insensibilité du nombre de packs créés et du choix de schéma logistique à la structure de la demande et aux coûts de transport ;
- la relative sensibilité du nombre de packs créés au coût d'existence des packs ;
- la sensibilité du choix de schéma logistique au coûts de stockage.

4.2. Relation entre diversité et stock

(Weng, 1999), (Huang et al 2005) et (Da Cunha 2004) notamment, soulignent que le dimensionnement des stocks de sécurité et diversité produits sont fortement dépendants. Nous retrouvons dans l'expérimentation précédente la sensibilité du modèle à ces deux paramètres : la diversité au travers du coût d'existence des packs ; le dimensionnement du stock de sécurité qui est partie intégrante du coût de stockage. Néanmoins, le modèle proposé ne représente pas explicitement cette dépendance. En effet, pour un schéma

logistique donné, le choix des packs créés n'influe que sur l'allocation des flux de demande aux différents packs. L'effet de cette allocation en terme de réduction de la variabilité de la demande en packs, et par suite sur le dimensionnement des stocks de sécurité, n'est pas représenté.

Dans notre modèle, revenir sur cette hypothèse, revient à modéliser une relation liant le dimensionnement des stocks de sécurité (intégré dans le paramètre Rot de l'équation (12)) aux packs créés. Une modélisation précise demanderait de caractériser la variabilité de la demande sur chaque segment de marché et compliquerait énormément le modèle (voir (Huang et al 2005) pour un tel modèle lorsque des covariances modélisent les variabilités entre segments de marchés avec un schéma logistique fixé ; voir aussi (Da Cunha 2004) pour la modélisation de dépendances complexes entre fonctions ; voir encore (Weng 1999) qui étudie différentes logiques de dimensionnement des stocks dans une chaîne logistique à deux échelons).

Nous proposons ici une approximation en considérant qu'il existe une relation entre le paramètre K (qui influe uniformément dans les équations (14) et (15) sur le dimensionnement des stocks) et le nombre de packs créés (ΣBPk) : $K=f(\Sigma BPk)$.

Nous ne cherchons pas à inclure explicitement cette relation, f , dans le modèle d'optimisation. Nous construisons alors une abaque pour chaque scénario de la demande. Chaque point de l'abaque correspond à un couple de valeurs (ΣBPk ; K) pour lequel nous résolvons le problème d'optimisation et retenons le schéma logistique trouvé et le prix de revient moyen d'un pack. Dans les abaques des Figure 3 et Figure 5, un point réfère au schéma logistique obtenu et les courbes de niveaux au prix de revient moyen d'un pack.

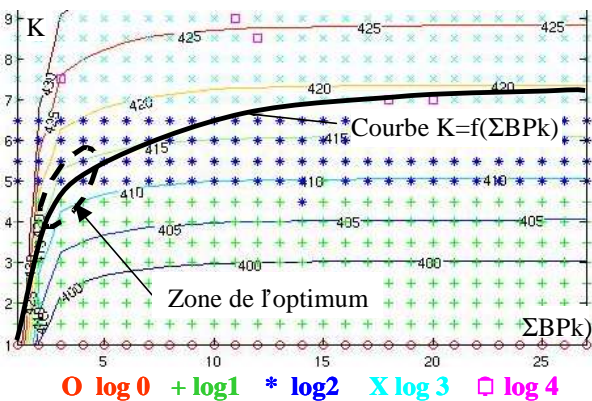


Figure 3 : effet d'une courbe $K=f(\Sigma BPk)$ sur le choix de schéma logistique : cas « fonctions indépendantes » et « marché centré bas de gamme ».

On voit que pour des valeurs de K importantes ($K > 6,5$), le schéma logistique préconisé est en général « log 3 » mais est parfois « log 4 » : ces deux schémas donnent des coûts de revient sensiblement équivalents

dont la différence est proche du niveau de précision de l'optimisation.

De plus, les courbes de niveau iso-coût sont très plates pour $\Sigma BPk > 10$ et traduisent une faible sensibilité au nombre de packs ouverts (ΣBPk).

Vu que les courbes de niveaux des coûts sont toutes croissantes, on vérifie sur la Figure 5 que :

- sans limite sur K et sur le nombre de pack, l'optimum revient à choisir le point en bas à droite qui correspond au choix du schéma logistique « log 0 » et à une diversité de 27 packs.
- En contraignant uniquement K , on impose des changements de schéma logistique mais le nombre de packs à choisir reste 27.
- En contraignant seulement ΣBPk , on impose une réduction de diversité sans induire un changement de schéma logistique.

Par contre, si l'on impose une fonction de dimensionnement des stocks en fonction de la diversité produit, $K=f(\Sigma BPk)$, on crée une relation entre le choix du schéma logistique et le choix de diversité. Sur l'exemple de la Figure 3, on voit que l'optimisation du coût de revient moyen d'un pack amène à choisir une valeur de K entre 4,5 et 5,5, une diversité de 2 à 4 packs, un schéma logistique de type « log 1 » ou « log 2 », pour un coût proche de 412 €/pack.

Toute la difficulté réside maintenant dans la définition de cette courbe $K=f(\Sigma BPk)$. Nous imaginons qu'elle peut être bâtie en faisant appel à des experts logistiques et en utilisant une abaque. Pour chaque point d'une abaque, nous disposons du schéma logistique préconisé et de la liste des packs choisis. L'expert peut alors analyser les flux engendrés dans cette solution et étudier le dimensionnement des stocks de manière plus précise pour déterminer le paramètre K qu'il choisirait. La courbe passe par les points pour lesquels l'expert choisi une valeur de K correspondant à celle pour laquelle ces points ont été obtenus.

Enfin, le cas étudié considère 3 fonctions à 3 niveaux de service pour générer une diversité de $3^3=27$ segments de marché. Le nombre de segments de marché croissant exponentiellement avec le nombre de fonctions, on déduit que le nombre de variables entières croît exponentiellement avec le nombre de fonctions. Ce qui va rapidement poser des difficultés pour l'optimisation. Ceci est une limite forte pour la construction de l'abaque qui demande l'amélioration du modèle d'optimisation.

5. CONCLUSION

Nous reprenons dans cette communication le modèle MILP de (Lamothe *et al.*, 2006) permettant simultanément le dimensionnement d'une chaîne logistique et la sélection d'un ensemble de produits (ou packs) pour satisfaire les différents segment d'un marché.

Nous avons proposé une série d'expérimentations faites sur un cas d'étude réaliste. Ce cas montre une très forte sensibilité du modèle au dimensionnement des stocks de sécurité et au contraire une robustesse aux paramètres traduisant une structure de la demande du marché. Vue cette sensibilité, et vu le besoin de représenter une dépendance entre stock de sécurité et diversité produit, nous proposons ensuite d'utiliser le modèle pour construire des abaques mettant en regard pour un coefficient donné de dimensionnement des stocks (K), et pour un nombre donné de pack à sélectionner (ΣBP_k), le schéma logistique proposé, et un prix de revient moyen des packs. Il suffit de tracer une courbe $K=f(\Sigma BP_k)$ sur l'abaque pour trouver le schéma logistique et la diversité de packs permettant de fournir au moindre coût le marché.

Par principe, le modèle proposé fait l'hypothèse de l'existence d'une relation simple liant K et ΣBP_k . En réalité, le dimensionnement de stock de sécurité est lié à la caractérisation de la variabilité de la demande sur chaque segment de marché et à l'affectation de ces segments de marchés aux packs sélectionnés. Le dimensionnement précis des stocks demanderait donc une masse d'information non considérée pour l'instant (les moments liant les probabilité de demande sur les différents segments) ainsi qu'une complexification certainement importante du modèle. Le modèle proposé ici est donc une approximation permettant de focaliser par la suite des études précises sur quelques solutions jugées satisfaisantes. Il reste néanmoins à poursuivre les travaux pour améliorer le dimensionnement des stocks de sécurité.

Cette communication fait aussi l'hypothèse que les différents segments de marché peuvent être satisfaits avec un nombre réduit de packs. Ceci nous permet de déduire une structure de nomenclature générique. D'autres approches existent pour arriver à fournir une diversité de marché importante et notamment la customisation de masse. Nous envisageons donc d'étudier l'idée d'une abaque pour la customisation de masse.

REFERENCES

Agard B., Cheung B., Da Cunha C., 2006, Selection of a modules stock composition using genetic algorithm, *12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing – INCOM 2006*, Saint-Etienne, France, May 17 – 19.

Bonnafé A., 2006, Expérimentation et analyse d'un modèle MIP d'optimisation de la conception de produit et du dimensionnement de la chaîne logistique, *Mémoire de master recherche Systèmes Industriels*, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Da Cunha C., 2004, Définition et gestion de produits semi-finis en vue d'une production de type assemblage à la commande, *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG*, 06/10/2004

Fine C.H., Golany B., Naseraldin H., 2005, Modeling trade-offs in three-dimensional concurrent engineering : a goal programming approach, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 389-403

Fixon S.K., 2005, product architecture assessment : a tool to link product, process, and supply chain design decisions, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 345-369

Forza C., Salvador F., Rungtusanatham M., 2005, Coordinating product design, process design, and supply chain design decisions. Part B. Coordinating approaches, tradeoffs and future research directions, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 319-324

Hadj-Hamou K., 2003, Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes, *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse*, Décembre 2003.

Hegge H.M.H., Wortmann J.C., 1991, Generic bill-of-material : a new product model, *International Journal of Production Economics*, vol 23, N°1-3, 117-128.

Huang G.Q., Zhang X.Y., Liang L., 2005, Towards integrated optimal configuration of platform products, manufacturing processes, and supply chains, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 267-290.

Lamothe J., Hadj-Hamou K., Aldanondo M., 2006, An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain, *European Journal of Operational research*, vol 169, N°3, 1030-1047

Rungtusanatham M., Forza C., 2005, Coordinating product design, process design and supply-chain decisions, Part A : Topic motivation, performances implications, and article review process, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 257-265.

Salvador F., Forza C., Rungtusanatham M., 2002, How to mass customize : products architectures, sourcing configurations, *Business Horizons*, vol 45, N°4, 51-69

Su J.C.P., Chang Y.L., Ferguson M., 2005, Evaluation of postponement structures to accomodate mass customization, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 305-318.

Thirumalai S., Sinha K.K., 2005, Customer satisfaction with order fulfillment in retail supply chains : implications of product type in electronic B2C transactions, *Journal of Operations Management*, vol 23, N°3-4, 291-303

U.S. Department of Labor, 2005, Bureau of Labor Statistics, International comparisons of hourly compensation costs for production workers in manufacturing, 2004, *USDL : 05-2197, 10*

Weng Z.K., 1999, Risk-pooling over demand uncertainty in the presence of product modularity, *Int. J. Production Economics*, vol 62, N°1-2, 75-85.

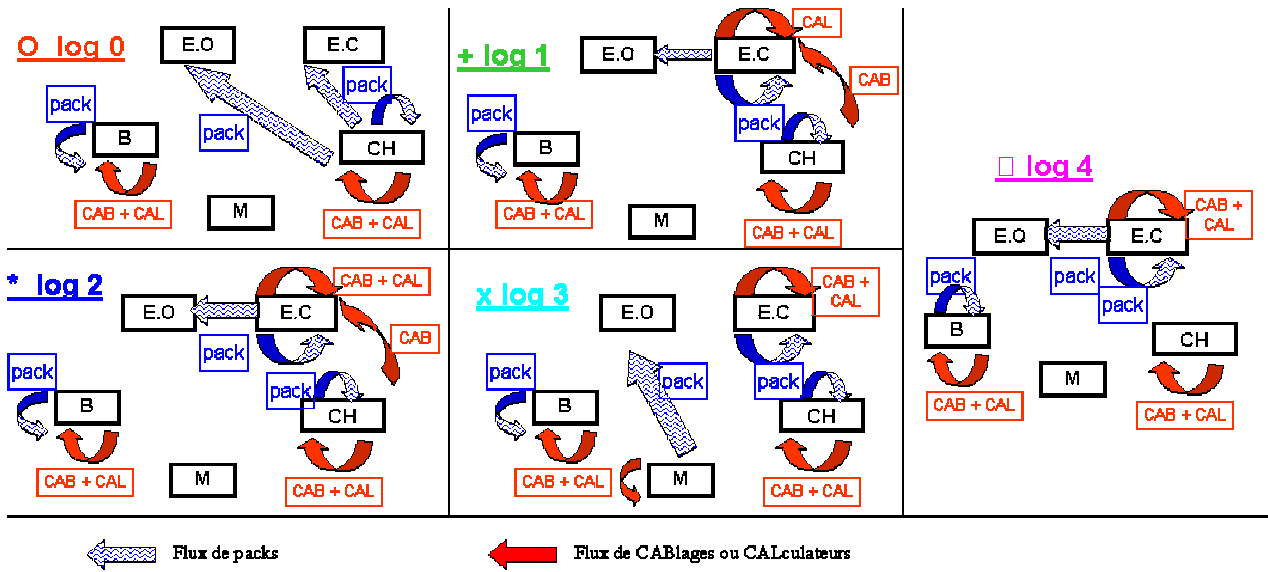


Figure 4 : 5 schémas logistiques obtenus

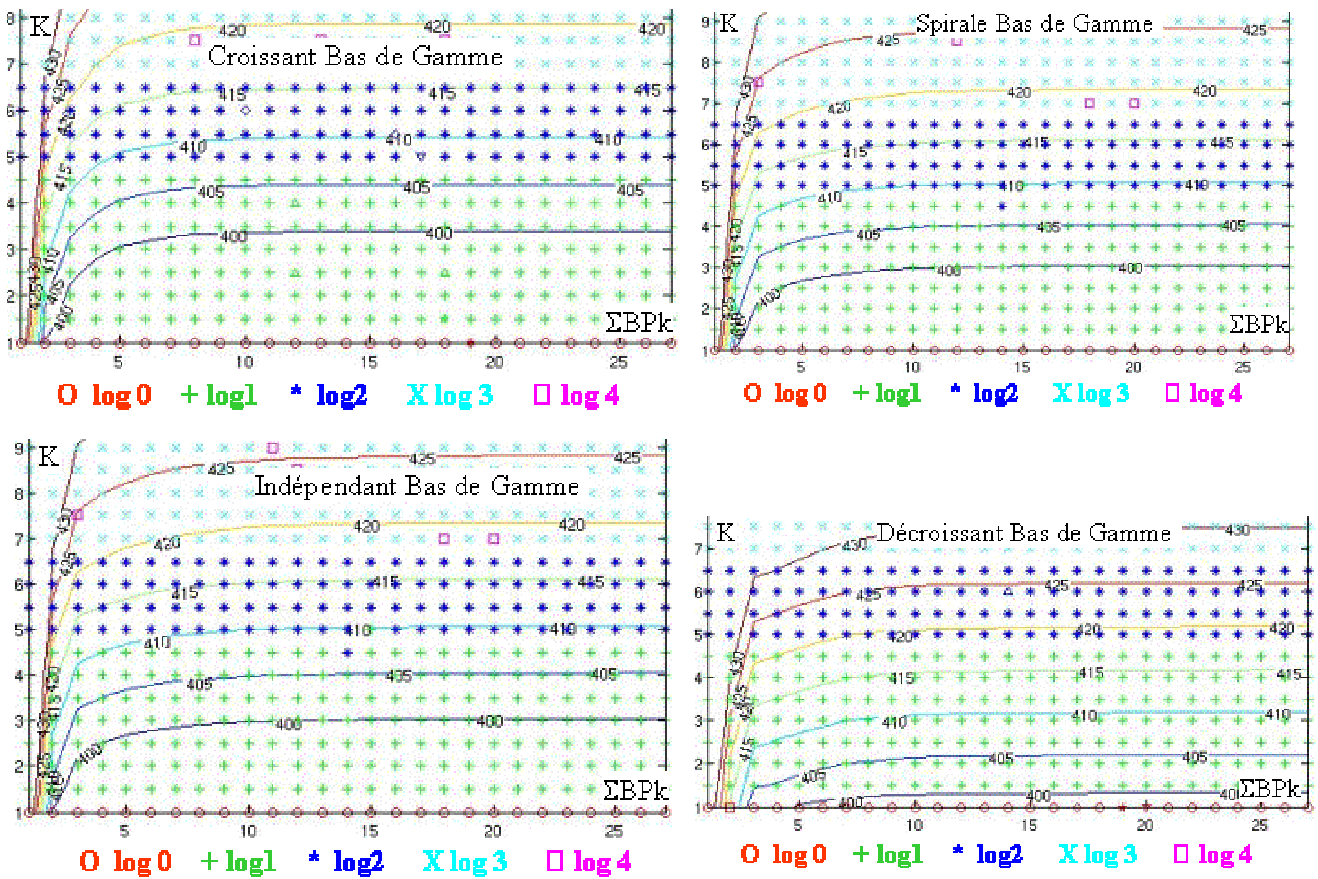


Figure 5 : abaques d'un marché bas de gamme pour différentes dépendances entre fonctions