

1999.13

Analyse économique de la standardisation des produits

Vincent Giard

Professeur à l'IAE de Paris • Université Panthéon - Sorbonne

Résumé : On s'intéresse à la standardisation de composants partiellement substituables destinés à satisfaire un ensemble de besoins. L'approche monocritère de la standardisation proposée au siècle dernier est enrichie par une prise en compte explicite de plusieurs critères et d'une valorisation économique au travers d'une modélisation par la programmation linéaire. La notion de diversité est creusée dans cette perspective et certains problèmes de coûts liés à l'usage de cette méthode sont abordés.

Mots clés : standardisation, conception de produits, production de masse, programmation linéaire.

Abstract: This paper is devoted to the standardization of components that are partly substitutable and designed to fit a set of needs. The mono-criterion approach developed in the last century is enbroaded by taking into account several criteria and an economic valuation, through a linear programming model. The concept of diversity is discussed with that perspective and some cost problems, encountered in the use of that method, are dicussed.

Keywords: standardization, product design, mass production, linear programming.

À l'époque où l'artisanat prévalait, le principal effort de standardisation était un effort d'étalonnage. Il portait sur l'établissement de mesures (monétaire, de poids, de longueur, etc.) permettant d'établir les échanges de biens et prestations sur des bases comparables et de fonder progressivement les sciences de la matière. Il faut attendre la révolution industrielle, rendue possible par l'évolution des connaissances, pour que l'usage de processus standardisés autorise la fabrication de produits substituables, permettant l'élaboration de produits finis de complexité croissante réalisés à partir de constituants identiques fabriqués sur des machines, elles aussi, de plus en plus sophistiquées. Cette standardisation des produits est compatible avec une production systématique de composants « sur mesure » souvent utilisés par un seul produit fini. La *rationalisation de la conception d'une gamme de produits homogènes partiellement interchangeables, destinée à couvrir un ensemble de besoins*, que l'on considérera ici comme la définition moderne de la standardisation des produits, se fait rapidement sentir. On commencera par discuter des relations entre diversité et standardisation (§ 1) avant de proposer une piste d'optimisation de cette standardisation (§ 2, page 5).

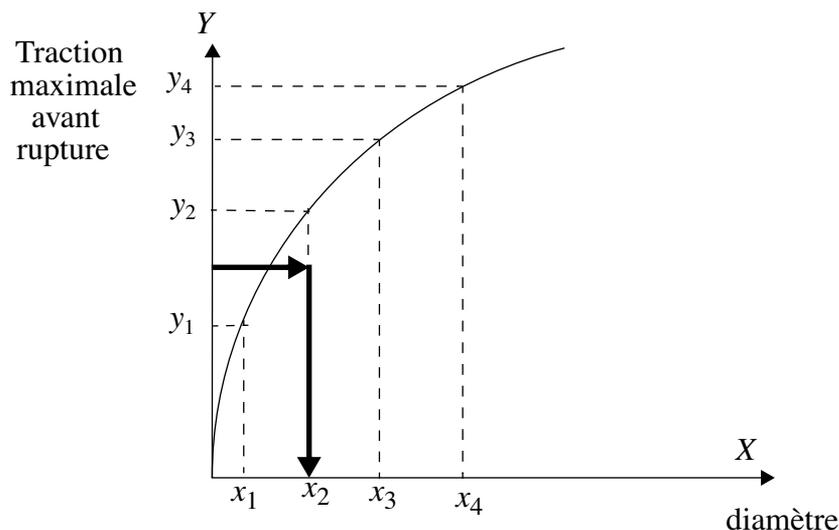
1 Diversité et standardisation

Après avoir rapidement examiné (§ 1-1) les fondements de la standardisation, il convient d'examiner plus en détail (§ 1-2, page 3) ce que recouvre le concept de diversité.

1-1 Les fondements de la standardisation

Des efforts de standardisation sont entrepris dans tous les pays industrialisés dans la première moitié du XIXe siècle. En France, il semblerait que la modélisation de cette rationalisation remonte au milieu du siècle dernier avec les travaux de Renard sur les cordages de la marine de guerre française : la sophistication croissante des navires, dont les gréements sont définis sur mesure, et l'expansion coloniale conduisent à une prolifération rapidement ingérable des stocks de cordages. L'idée suivie est relativement simple. Dans le problème posé, la caractéristique essentielle d'un cordage est la traction maximale Y qu'un cordage de diamètre X peut subir avant rupture. Un test sur des cordages de diamètres différents permet d'établir la [figure 1](#). Il suffit ensuite de découper l'axe des ordonnées en un certain nombre de plages disjointes et d'associer, à toute demande caractérisée par une traction y_k , le diamètre associé à la borne supérieure de la plage de valeurs qui contient y_k (soit, dans l'exemple de la [figure 1](#), pour une spécification de traction limite avant rupture comprise entre y_1 et y_2 , un cordage de diamètre x_2).

Figure 1 : analyse de la traction limite avant rupture des cordages par Renard



Cette approche du problème permet de limiter astucieusement le nombre de références à produire et gérer mais le problème qui reste à résoudre est celui de la définition du nombre de plages de valeurs et de leurs définitions. Pour ce faire, des travaux empiriques ont proposé des solutions (et ont donné naissance, en particulier aux « séries Renard » encore utilisées dans l'industrie). Avant de proposer une modélisation économique de ce problème dans une optique de généralisation multicritère, il n'est pas inutile de replacer cette problématique dans celle plus large de la diversité et de son coût, dans un contexte économique qui tente de plus

en plus de séduire le client par une production à la commande de bien et de service « sur mesure ».

1-2 Analyse de la diversité

On ne s'intéresse pas ici au problème de la perception globale de produits finis par le consommateur ou le client potentiel. Cette perception est conditionnée par de très nombreux facteurs dont beaucoup dépendent du mix retenu en marketing et qui ne relèvent pas de notre préoccupation. On s'attache ici à la diversité observable en production, sur des composants d'un produit fini satisfaisant des besoins de même nature, la présence de l'un de ces composants étant nécessaire. Ce faisant, on écarte du champ d'analyse, la diversité supplémentaire obtenue par l'adjonction de composants optionnels¹.

Trois types de production sur mesure doivent être distingués (voir Anderson & Pine, [1]). Certaines caractéristiques d'un produit peuvent être *personnalisées par le client* pour une parfaite adéquation à ses goûts ou besoins. C'est ainsi que le détenteur d'une chaîne stéréo peut régler certaines caractéristiques de son tuner pour que le son de sa chaîne corresponde à ses préférences, que le conducteur de certains modèles automobiles peut régler à sa guise la hauteur et l'inclinaison de son volant ou que l'utilisateur d'un micro-ordinateur peut paramétrer à sa guise, son environnement de travail. D'autres produits sont *auto-adaptables*, c'est-à-dire qu'ils s'ajustent automatiquement au contexte de l'usage qui en est fait pour assurer au mieux la fonction qui est leur raison d'être. Cette catégorie de produits peut être illustrée par les rasoirs électriques à têtes flottantes ou par les machines à laver utilisant la logique floue pour décider du meilleur cycle de lavage (ce qui constitue un progrès par rapport aux machines à laver personnalisées par quelques dizaines de programmes de lavage, entre lesquelles l'utilisateur a bien souvent du mal à choisir). Enfin, certains produits sont *personnalisés par le constructeur* (et, dans certains cas, par le vendeur). Plusieurs solutions, non exclusives pour définir cette personnalisation, sont possibles.

- La solution la plus connue est celle de l'usage d'une *combinaison appropriée de modules*, chaque module étant choisi dans un ensemble limité de modules interchangeables². Cette solution, largement utilisée dans l'industrie automobile, implique non seulement un processus productif standardisé (pour minimiser les réglages et changement d'outillage) et une substituabilité totale des modules d'une même famille au montage, mais aussi, pour limiter les «risques

1. Ce type de diversité génère des coûts supplémentaires lorsque le produit est assemblé sur une ligne, du fait de la variabilité de travail que le montage de composants optionnels induit sur certains postes, ce qui pose des problèmes particuliers d'équilibrage de chaîne et d'ordonnancement (voir Danjou, Giard & Le Roy, [5]). Il peut être économiquement plus intéressant d'offrir systématiquement une option beaucoup demandée et si la demande porte sur quelques options alternatives, il est alors possible de se raccrocher à la démarche décrite ici. Inversement, on peut s'interroger sur l'intérêt économique d'options peu demandées.

2. L'intérêt économique de cette approche modulaire est perçue dans les années soixante (voir Tarondeau, [24]) et continue de susciter un intérêt chez les gestionnaires (Baldwin & Clark, [2]). Dans cette approche, la conception d'un système complexe (produit ou processus) s'appuie principalement sur un mécano de sous-systèmes élémentaires conçus indépendamment puis assemblés pour satisfaire un besoin précis. La standardisation peut être appliquée dans la définition d'un ensemble de modules physiquement interchangeables et assurant une même fonction mais les concepts de modularité et de standardisation ne doivent donc pas être confondus. Cela étant une approche modulaire efficace repose sur une standardisation optimisée de chaque famille de modules interchangeables d'un point de vue fonctionnel, cette optimisation pouvant s'appuyer sur l'approche proposée ici.

système» de dysfonctionnement, la conception de supports de montage standardisés¹, assurés d'une pérennité suffisante et robustes, c'est-à-dire acceptant un large spectre de contraintes (électriques, mécaniques, etc.).

- L'usage de *composants ajustables de manière réversible* conduit à une personnalisation immédiate et peu coûteuse d'un composant donné par différents moyens (commutateur, logiciel...) pour activer un ensemble de fonctionnalités prises dans un ensemble possible, cette décision pouvant être réversible. Cette technique est souvent retenue dans la conception de composants électroniques ou électriques.
- L'usage de *composants ajustables de manière irréversible* correspond à une adaptation immédiate et peu coûteuse d'un composant aux besoins soit par un traitement physique de découpe, soit par un traitement chimique, irréversible dans les deux cas. On trouve de tels produits dans la confection, la lunetterie, la fabrication de vélos sur mesure ou celle de portes et fenêtres de rénovation. La différenciation retardée procède souvent de cette logique.

Les moyens d'obtenir la diversité d'un produit fini sont donc nombreux et permettent d'éviter un appel à un sur-mesure systématique et coûteux. Pour en faire l'analyse économique, il importe de tenir compte de deux points de vue.

- Un composant n'a pas, a priori, pour vocation de n'être utilisé que par un seul produit fini, en raison de synergies de conception, fabrication et distribution. Ce problème de rationalisation de la conception des produits d'une l'entreprise doit donc se traiter au niveau de l'ensemble des familles de produits technologiquement proches et non au niveau de chaque produit élémentaire, sachant que l'analyse des nomenclatures industrielles de produits complexes montrant qu'un même composant élémentaire se retrouve normalement dans de nombreux produits agrégés différents². Le problème de rationalisation de la conception des produits traite de la *satisfaction d'un ensemble de besoins fonctionnels élémentaires par une gamme de composants physiquement interchangeables, chaque composant se positionnant sur spectre limité de chacun des besoins fonctionnels retenus*. Cette approche de la standardisation en fait l'une des composantes de la *flexibilité* de l'entreprise, complémentaire de celle qui porte sur les ressources (équipements, personnels, procédures).
- Cette variété de composants utilisés doit être perceptible par le client et présenter une valeur ajoutée pour lui. Les exemples de diversité visible par le client mais sans valeur ajoutée sont nombreux. Par exemple, en 1993, Nissan décidant de rationaliser ses approvisionnements, dénombrait pas moins de 300 cendriers équipant l'ensemble de ses véhicules automobiles (cité dans [1], p. 95). Plus grave est la diversité interne au produit non perceptible pour le client (la visserie est un exemple classique de ce type de diversité). En effet, en général, elle est non seulement sans valeur ajoutée pour le client mais elle est aussi souvent génératrice de coûts additionnels (en raison de problèmes logistiques supplémentaires, d'une diversification accrue d'outillage, etc.).

Presque toujours, l'analyse technique des références de la nomenclature de production et d'approvisionnement fait apparaître une part importante de compo-

1. Ces supports de montage standardisés sont souvent appelés **plate-forme** et leur conception est liée à la politique de modularité définie dans une approche systémique (voir Meyer & Lehner, [15]).

2. Les spécialistes parlent de *commonality*, traduit par communalité (voir Tarondeau, [23], partie II, et Fouque, [6]).

sants de caractéristiques identiques ou très voisines. Les raisons de cette prolifération sont multiples et bien connues : incompréhension de l'impact de la prolifération des références en production et en après-vente, syndrome du P2I (Pas Inventé Ici), décisions arbitraires en conception, argument fallacieux du « juste poids, etc », défaillance du système d'information conduisant à rendre plus rapide la création d'une nouvelle référence que la recherche d'une référence existante. Il est évident que l'approche économique de la standardisation qui va être développée ci-après ne présente d'intérêt que si ces causes de proliférations ne sont pas perçues et progressivement éliminées.

La recherche d'une optimisation de la standardisation suppose d'une part que des besoins fonctionnels soient correctement évalués et traduits en spécifications techniques, ce que facilite l'approche QFD (Quality Function Deployment¹), et qu'une réflexion cohérente et pertinente soit conduite sur l'ensemble des solutions que l'on considère comme judicieuses. Il est évident que la solution optimale d'un problème mal posé ne présente pas grand intérêt (accessoirement, elle risque de discréditer la méthode et non le mauvais usage qui en est fait). La détermination du portefeuille de solutions à examiner repose sur une réflexion n'éliminant a priori aucun des modes de personnalisation présentés ci-dessus. Bien évidemment, l'existant (fabrication interne ou approvisionnement) doit faire partie des alternatives étudiées et les produits nouveaux envisagés doivent tenir compte des contraintes du système productif existant ou en cours de transformation². Normalement, le résultat de l'optimisation de cette standardisation est non seulement une baisse de coûts de production mais aussi un accroissement de la *flexibilité* de l'entreprise qui peut réagir plus rapidement et facilement à des transformations conjoncturelles et structurelles de la demande³.

2 Vers une optimisation de la standardisation

Après avoir présenté (§ 2-1) une modélisation générale du problème posé par la programmation linéaire, on examinera (§ 2-2, page 11) quelques problèmes méthodologiques posés par cette rationalisation économique, que l'on fasse ou non appel à la démarche d'optimisation proposée.

2-1 Présentation du modèle de base

Pour des produits simples et peu onéreux (visserie, par exemple, ou, encore, les cendriers de l'exemple de Nissan cité plus haut), une analyse sophistiquée ne s'impose généralement pas dans la mesure où la réduction du nombre de compo-

1. Le Quality Function Deployment est une technique d'optimisation de la chaîne de valeur depuis l'expression des besoins jusqu'à l'après-vente. Elle est d'origine japonaise et utilisée depuis plus de 20 ans par de grandes entreprises, en particulier avec la première étape de la démarche permettant de passer des besoins fonctionnels aux spécifications techniques. Un panorama de ces techniques peut être trouvé dans l'ouvrage de Revelle, Moran & Cox, [20].

2. Cette catégorie de préoccupation étant prise en compte dans la littérature du DFA (Design For Assembly) ; voir sur ce point Nof, Wilhelm & Warnecke, [17], chap. III, et Redford & J. Chal, [18].

3. La flexibilité des entreprises est classiquement (voir Tarondeau, [23], [24], Cohendet et Llerenna, [4], et Reix, [19]) vue à travers les ressources mobilisées (équipements, outillages, personnel et procédures) ; la flexibilité liée au produit est également soulignée mais, assez paradoxalement, l'instrumentation économique de son amélioration est, à notre connaissance, très peu étudiée (voir Fouque, [6]) et pas dans la perspective retenue ici.

sants assurant une fonction s'impose d'elle-même tant au niveau de la simplification des nomenclatures que de celle des processus productifs et des approvisionnements.

Dans les autres cas, l'approche de Renard est utilisée pour rationaliser la gamme de produits relativement simples, généralement caractérisés par un critère quantitatif unique. Des analyses de Pareto sur la distribution des besoins selon ce critère quantitatif (voir, par exemple, [1], chap. V) fondent des approches empiriques permettant de définir une gamme de produits mais la démarche se fonde sur l'intuition et prend difficilement en compte le point de vue économique. En outre, la complexité des produits fait que l'analyse technique peut difficilement être de type monocritère. Une formulation de ce problème par la programmation linéaire en nombres entiers apporte des éléments de réponse pertinents à ces préoccupations¹ que l'approche éprouvée des modelers permet facilement de mettre en œuvre².

On présentera le modèle en illustrant le raisonnement par un exemple de moteurs. D'un point de vue technique, on est en présence de n variantes possibles d'un produit³, que ces variantes soient effectivement produites ou seulement à l'étude. On repérera par l'indice j ces différentes variantes. Par ailleurs, on suppose que l'analyse de la demande a permis d'identifier m segments, repérés par un indice i et caractérisés par une demande d_i . En partant d'une situation existante, on doit normalement avoir $n \leq m$, c'est-à-dire que la variété de l'offre commerciale est inférieure ou égale à la variété de la demande.

Le problème posé, dans un premier temps est celui d'une éventuelle diminution du nombre de variantes (sans vision économique du problème). Une première analyse technique doit être conduite pour caractériser les différents moteurs. Les critères retenus seront relatifs à des caractéristiques techniques plus ou moins bien perçues par la demande (puissance, pollution, consommation d'essence...) et des caractéristiques sans intérêt pour le client mais essentielle dans la gestion des interfaces (poids, encombrement, mode de fixation du moteur sur le châssis...). Cette analyse technique est conduite sur un tableau du type du [tableau 1](#), avec une caractérisation littérale dans chaque cellule du tableau pour indiquer le positionnement précis de chaque moteur.

Une seconde analyse est à faire sur les caractéristiques techniques des moteurs demandés (cf [tableau 2](#)). Pour chacun des critères précédemment identifiés, on

1. Dans un document de recherche ancien ([8], 1990), nous avons présenté très sommairement un modèle d'inspiration voisine en le plaçant dans une perspective plus restrictive. Dans un ouvrage récent ([9], 1998), nous avons proposé une approche systématique de la modélisation de processus productifs par la programmation mathématique en montrant les filiations entre différents modèles que l'on trouve dans la littérature de recherche opérationnelle et en expliquant les mécanismes de création de modèles complexes par mécano de composants de base. Formellement, le problème traité ici combine une transposition d'un modèle d'assignation de clients à des centres de production ([9], p. 46) et la prise en compte de fonctions de coûts non linéaires avec charges fixes variant par palier ([9], p. 97 et sq.), à ceci près que la production totale d'une référence est ici la somme de productions demandées par différents segments.

2. Une présentation de cette approche par modeler peut être trouvée dans Murphy, Stohr & Asthana, [16], Rosenthal [21], Jacquet-Lagrèze, [14] et Giard, [9]. La viabilité technique et économique de cette approche est attestée par de très nombreuses réalisations (par exemple, deux importantes applications industrielles de ces approches ont été réalisées à l'IAE de Paris dans le cadre de contrats de recherche ; elles sont décrites dans Giard, Triomphe, André, [13], et Giard & Triomphe, [10]).

3. Chez Renault, par exemple, l'usine de Cléon fabrique plus de 400 variantes possibles de moteurs.

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des moteurs étudiés

Moteurs étudiés	Caractéristiques			
	1	2	...	p
1				
2				
j				
n				

définit alors, selon le type de caractéristiques, une plage de valeurs admissibles (puissance minimale, par exemple) ou une liste d'occurrences acceptables si la caractéristique est qualitative (comme un mode de fixation, par exemple). L'une des difficultés que l'on rencontre alors est celle de la détermination du « juste besoin » correspondant à satisfaire, comme on l'a déjà évoqué.

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des moteurs demandés

Moteurs demandés	Caractéristiques				Demande
	1	2	...	p	
1					d_1
2					d_2
i					d_i
m					d_m

La confrontation des tableaux 1 et 2 permet d'établir le **tableau 3** dans lequel les coefficients a_{ij} ne peuvent prendre que la valeur 1, si la demande du segment i peut être satisfaite par le moteur j , ou 0, dans le cas contraire (l'illustration numérique étant parfaitement arbitraire).

Tableau 3 : Possibilités de satisfaction de la demande par l'offre

Segments du marché	Variantes de moteurs étudiés						
	1	2	3	...	j	...	n
1	1	0	0	...	0	...	0
2	1	1	0	...	0	...	0
3	1	0	1	...	0	...	0
...
i	0	1	1	...	1	...	0
...
m	0	0	1	...	1	...	1

Il semble réaliste d'imposer que la totalité d'un segment de demande soit satisfaite par une même variante. En conséquence, on définit la variable binaire x_{ij} qui prendra la valeur 1 si la demande du segment i est satisfaite en totalité par un moteur j et 0, dans le cas contraire. Bien évidemment, il est inutile de créer une variable x_{ij} si le paramètre a_{ij} correspondant est nul¹. Par ailleurs, si on décide que cette demande peut être couverte par plusieurs variantes, alors la variable x_{ij} peut prendre n'importe quelle valeur comprise entre 0 et 1. Pour forcer la demande du

segment i à être satisfaite, on est amené à poser la contrainte de la [relation 1](#) (qui conduit, dans le cas de variables binaires, à n'avoir qu'une valeur non nulle).

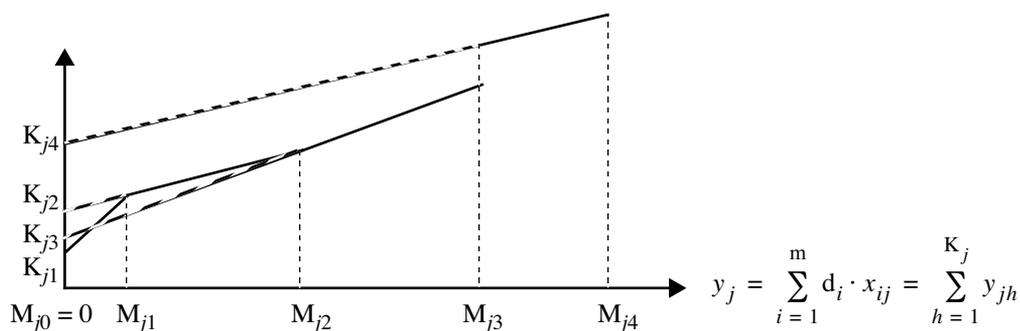
$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \text{ pour } i = 1, \dots, m \text{ (satisfaction de la demande)} \quad \text{Relation 1}$$

Dans ces conditions, la production y_j de la référence j est alors la somme des productions réalisées pour chaque segment (demande d_i), cette production pouvant être nulle. Cette contrainte est définie par la [relation 2](#) :

$$y_j = \sum_{i=1}^m d_i \cdot x_{ij}, \text{ pour } j = 1, \dots, n \text{ (production de la référence } j) \quad \text{Relation 2}$$

Pour établir le coût annuel de cette production, il est nécessaire d'introduire des hypothèses explicites sur la forme de la fonction de coût d'une référence. Dans un premier temps, on supposera que les fonctions de coût sont indépendantes. Cette hypothèse restrictive sera levée ultérieurement. On supposera également que l'on est en présence d'une variation de charges fixes annuelles par palier et que sur chaque palier, le coût variable unitaire puisse varier mais en restant constant sur des plages de valeurs disjointes ; ces hypothèses très générales conduisent à une fonction de coût du type de celle décrite dans la [figure 2](#).

Figure 2 : fonction de coût de production



On notera que cette fonction de coût total n'est ni concave (ce qui implique que le coût moyen de production ne croisse jamais lorsque x croît) ni convexe (ce qui implique que le coût moyen de production ne décroisse jamais lorsque y_j croît) et que, dans l'exemple retenu, elle permet de prendre en compte des phénomènes de déséconomies d'échelle se produisant à la limite de saturation. La prise en compte de cette fonction de coût non linéaire dans la fonction-objectif d'un programme linéaire s'effectue sans difficulté, en introduisant autant de productions fictives y_{jk} qu'il y a de plages K_j de valeurs (comprise entre $M_{j, k-1}$ et $M_{j, k}$, la borne supérieure appartenant seule à l'intervalle, avec $M_{j0} = 0$) sur lesquelles le coût variable c_{jk} est constant et qui sont toutes nulles, sauf celle qui inclut la production y_j dans sa plage de valeurs et qui est, bien entendu, égale à cette production ($y_j = y_{jh}$). En nous appuyant sur l'exemple décrit dans la [figure 2](#), la fonction-objectif devient, pour la partie relative au coût de production de y_j :

1. Cette particularité, facile à prendre en compte dans la description du problème par un modèleur (voir, par exemple [9], [14]) permet de limiter de manière importante la taille du problème. Cette convention rend inutile de met-

tre la [relation 1](#) sous la forme $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} = 1$.

Min z , avec $z = (c_{j1}y_{j1} + K_{j1}z_{j1}) + (c_{j2}y_{j2} + K_{j2}z_{j2}) + (c_{j3}y_{j3} + K_{j3}z_{j3}) + (c_{j4}y_{j4} + K_{j4}z_{j4}) + \dots$

avec la série suivante de contraintes¹, s'ajoutant à celles des relations 1 et 2 :

$$z_{j1} + z_{j2} + z_{j3} + z_{j4} \leq 1$$

$$0 \leq y_{j1} < M_{j1}z_{j1}$$

$$M_{j1}z_{j2} \leq y_{j2} < M_{j2}z_{j2}$$

$$M_{j2}z_{j3} \leq y_{j3} < M_{j3}z_{j3}$$

$$M_{j3}z_{j4} \leq y_{j4} < M_{j4}z_{j4}$$

La première contrainte ($z_{j1} + z_{j2} + z_{j3} + z_{j4} \leq 1$) permet d'activer au plus l'une des charges fixes de coût ($K_{jk}z_{jk}$), celle pour laquelle $z_k = 1$, étant entendu que si l'on ne produit pas cette référence, tous les z_{jk} sont nuls. Les contraintes suivantes forcent à 0 les productions y_{jk} des tranches non retenues, puisque, lorsque $z_{jk} = 0$, les deux bornes sont nulles forçant la production correspondante x_k à être nulle et réciproquement².

La généralisation du raisonnement pour l'ensemble des variantes conduit à la fonction-objectif de la relation 3 et aux contraintes décrites par les relations 1 à 5 :

$$\text{Min } z, \text{ avec } z = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^{K_j} (c_k y_{jk} + K_{jk} z_{jk}) \right] \quad \text{Relation 3}$$

$$\sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} \leq 1, \text{ pour } j = 1 \dots n \quad \text{Relation 4}$$

$$M_{jk-1}z_{jk} \leq y_{jk} < M_{jk}z_{jk}, \text{ pour } k = 1 \dots K_j \text{ et } j = 1 \dots n, \text{ avec } M_{j0} = 0 \quad \text{Relation 5}$$

Cette formulation doit être adaptée pour prendre en compte des effets de synergie positifs ou négatifs liés à la production simultanée de deux ou plusieurs moteurs sur un site de production. Pour ce faire, on dispose de moyens de modélisation pertinents et faciles à mettre en œuvre³. Examinons quelques cas de figure.

- Supposons que le fait de fabriquer plus de κ variantes se traduise par une augmentation Γ^+ des charges fixes annuelles, il suffit alors de créer la variable binaire γ^+ , d'ajouter à la fonction-objectif le terme $\gamma^+\Gamma^+$ et d'ajouter aux contraintes la relation 6 pour forcer γ^+ à prendre la valeur 1 si au moins κ variantes sont mises en production (la fonction-objectif ayant pour effet de tendre à rendre nul γ^+).

$$\sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} \right] < \kappa + n\gamma^+ \quad \text{Relation 6}$$

1. Les variables étant non négatives, la première contrainte double se réduit en réalité à $x_1 \leq M_1 y_1$; la formulation retenue a pour seul avantage de permettre la généralisation du raisonnement.

2. Si la fonction de coût est concave (fonction de coût total non décroissante), alors la «partie droite» des doubles inéquations est inutile.

3. Voir Giard, [9], chapitre III.

Bien évidemment, cette relation s'adapte sans difficulté à un sous-ensemble de moteurs ou à plusieurs sous-ensembles de moteurs. Dans ce dernier cas, les sous-ensembles peuvent être disjoints, ce que l'on rencontrera en cas d'utilisation d'ensembles de moyens spécialisés techniquement dans la production d'ensembles différents de moteurs. On peut aussi retrouver le même ensemble de moteurs dans plusieurs contraintes de ce type pour obtenir une variation supplémentaire des charges fixes par palier en fonction non pas des quantités totales produites mais du nombre de références produites.

- Supposons, au contraire, que le fait de fabriquer plus de κ variantes se traduise par une diminution Γ^- des charges fixes annuelles, il suffit alors de créer la variable binaire γ^- , de retrancher à la fonction-objectif le terme $\gamma^- \Gamma^-$ et d'ajouter aux contraintes la [relation 7](#) pour forcer γ^- à ne prendre la valeur 1 que si au moins κ variantes sont mises en production (la fonction-objectif ayant pour effet de tendre à rendre γ^- égal à 1).

$$\sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} \right] > \kappa \gamma^- \quad \text{Relation 7}$$

Là encore, cette approche s'adapte sans difficulté à un sous-ensemble de variantes ou à plusieurs sous-ensembles de variantes. En outre, rien n'empêche d'avoir simultanément des effets de synergie positifs ou négatifs sur des ensembles de variantes différents ou non, en généralisation des remarques faites précédemment.

- On peut supposer enfin que certaines charges fixes varient par palier en fonction des quantités produites sur un ensemble de références, indépendamment de la possibilité offerte pour chaque référence d'inclure dans sa fonction de coûts une propre variation de charges fixes par palier. Dans ce cas, le sous-ensemble Ω de moteurs étant concerné par ces variations de charges fixes, il suffit d'adapter la formulation comme suit :
 - créer la variable ω correspondant à la production totale de ce sous-ensemble Ω de moteurs, ce qui conduit à la [relation 8](#):

$$\omega = \sum_{j \subseteq \Omega} y_j = \sum_{j \subseteq \Omega} \sum_{i=1}^m d_i \cdot x_{ij} \quad \text{Relation 8}$$

- d'ajouter à la fonction-objectif l'incidence de variation de charges fixes $K_{\omega k}$, en suivant la même démarche que celle utilisée pour une référence

$$\sum_{k=1}^{K_{\omega}} K_{\omega k} z_{\omega k}$$

- d'adapter ensuite les relations [2](#), [4](#) et [5](#), ce qui conduit aux relations [9](#) à [11](#) :

$$\omega \leq \sum_{k=1}^{K_{\omega}} \omega_k \quad \text{Relation 9}$$

$$\sum_{k=1}^{K_{\omega}} z_{\omega k} \leq 1 \quad \text{Relation 10}$$

$$M_{\omega k-1} z_{\omega k} \leq \omega_k < M_{\omega k} z_{\omega k}, \text{ pour } k = 1 \dots K_{\omega}, \text{ avec } M_{\omega 0} = 0 \quad \text{Relation 11}$$

2-2 Quelques problèmes méthodologiques posés par l'utilisation de cette approche optimisatrice

La pertinence de cette modélisation reste tout autant tributaire de l'usage qui en est fait pour décrire des scénarios alternatifs que des coûts utilisés dans la fonction économique.

Sur le premier point, il est évident que l'on travaille avec un niveau de détail trop grossier pour pouvoir prétendre représenter correctement les processus effectivement utilisés, la demande effective qui s'adresse au système productif, avec ses fluctuations saisonnières et aléatoires, ou la robustesse du système productif aux aléas. Cette critique peut être formulée pour la plupart des éclairages apportés à la prise de décisions stratégiques : ce qui importe, c'est la pertinence de l'ordre de grandeur des données en volume ou en valeur obtenues. Ceci nous ramène aux problèmes de valorisation.

Les principaux problèmes rencontrés tournent autour du temps ou, plus exactement, de la prise en compte correcte de l'interdépendance temporelle des décisions à travers le système de coûts utilisé en comptabilité de gestion.

Dans le cas, peu fréquent, où les alternatives étudiées concernent une production nouvelle à partir d'équipements nouveaux, il est facilement envisageable d'utiliser une version dynamique du modèle proposé, étant entendu que la décision de satisfaire un segment de demande par un moteur donné est prise pour l'ensemble des périodes¹ ; d'autres hypothèses sont utilisables mais semblent plus difficiles à justifier. La séparation entre charges fixes et charges variables permet d'isoler les investissements effectués au démarrage (et donc d'éviter le problème de la détermination de l'amortissement), des charges fixes directes (personnel en particulier) qui peuvent varier par palier en fonction des quantités produites et des charges variables directes (matières, etc.). Ces informations utilisées dans la fonction économique étant datées², il faut envisager de faire appel à l'actualisation pour pondérer correctement des flux financiers secrétés à des périodes différentes. Dans l'application de cette approche on retrouve les problèmes classiquement posés dans la comparaison d'alternatives d'investissement et, en particulier, celui de la détermination du taux d'actualisation de référence et celui posé par la comparaison de solutions ayant des durées de vie différentes.

Lorsque le problème concerne un ensemble de références qui existe au moins partiellement, fait l'objet d'un approvisionnement externe ou d'une production interne dans un système productif susceptible de n'être modifié qu'à la marge, plusieurs problèmes méthodologiques se posent.

- Certains composants-clés, d'une certaine complexité, sont conçus pour être utilisés par de nombreux produits finis dont certains n'existent pas encore ; dans

1. Ce qui se traduit par le maintien en l'état de la [relation 1](#) et l'adaptation suivante de la [relation 2](#) qui devient :

$$y_{jt} = \sum_{i=1}^m d_{it} \cdot x_{ij}, \text{ les relations 3 à 5 étant modifiées par l'adjonction de l'indice de période, la relation 3 devant}$$

en outre intégrer des coefficients d'actualisation.

2. (note de la page précédente) Ce qui permet, avec un découpage temporel approprié, de prendre en compte d'éventuels effets d'apprentissage sur les coûts récurrents, avec des valeurs que l'on peut raisonnablement considérer comme stables sur chaque plage de temps.

l'industrie automobile, on parle de projets «organes». Le prix de cession de tels composants pose de redoutables problèmes méthodologiques¹. Une décision de standardisation qui remet sensiblement en cause les hypothèses économiques qui ont présidé au lancement de tels composants doit s'appuyer sur une fonction de coût qui garantit la cohérence des décisions au cours du temps et entre décisions stratégiques et tactiques (voir Giard, [10], [11]).

- Dans cet ordre d'idée et plus généralement, la décision d'arrêt de la production d'une référence (ou d'un groupe de références) peut conduire à supporter un coût de «désengagement». Cet impact peut facilement être pris en compte par la fonction objectif².
- Les coûts standards existant ne sont pertinents que sur une certaine plage de quantités produites ou approvisionnées : avant toute application de la méthode, il convient de pousser des investigations pour reconstituer la fonction de coûts et, dans le cas d'approvisionnement, de procéder à une consultation préalable des fournisseurs, sur la base de scénarios volumétriques pouvant s'écarter sensiblement de la solution actuelle.
- Le problème de standardisation peut se poser dans le cadre d'une nomenclature à étages. Les décisions prises à un niveau détaillé, reposent alors sur des hypothèses de demande directes et de demandes provenant, selon des mécanismes de type MRP, d'autres références faisant elles-mêmes l'objet d'une optimisation de standardisation. Une analyse indépendante de ces différents problèmes conduit à faire dépendre le problème de la standardisation de composants élémentaires d'hypothétiques demandes de composants agrégés et à faire dépendre le problème de la standardisation de composants agrégés, d'hypothétiques coûts de composants élémentaires. Une convergence vers un ensemble de solutions cohérentes peut être assurée empiriquement au prix d'un certain nombre d'itérations mais on peut aussi préférer adapter ce modèle pour tenir compte de nomenclature liant les références³, ce qui peut conduire à un modèle de trop grande dimension.
- La création de composants nouveaux induit des coûts de gestion liés à l'accroissement de la diversité qui sont difficiles à évaluer. Dans les calculs écono-

1. Pour une présentation plus complète des problèmes liés au pilotage économique de produits sur leurs cycles de vie, voir Gautier et Giard, [7].

2. En utilisant les notations de la [relation 4 de la page 9](#), pour une charge Φ , il suffit d'ajouter dans la fonction-

objectif le terme $\left\{1 - \sum_{k=1}^{K_j} z_{jk}\right\} \Phi$. Sachant que $\sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} = 1$ si la référence j est produite, la charge Φ ne sera pas supportée dans ce seul cas. La généralisation à un ensemble Ψ de ψ références est immédiat $\{1 - t\} \Phi$,

avec $\sum_{j \in \Psi} \sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} - \psi < t$.

3. (*note de la page précédente*) Il suffit de remplacer la [relation 2 de la page 8](#) ($y_j = \sum_{i=1}^m d_i \cdot x_{ij}$) qui définit la production y_j , comme égale à la somme des demandes d_i qui lui sont affectées par les variables binaires x_{ij} ,

par la relation suivante : $y_j = \sum_{i=1}^m d_i \cdot x_{ij} + \sum_{h=1}^m a_{hj} \cdot y_h \cdot x_{hj}$, où la référence h est liée à la référence j par le fait que sa production de 1 unité de la référence h requiert a_{hj} unité de la référence j . (cette référence h étant, à son tour, liée à des demandes finales par la [relation 2](#)).

miques faits en phase de conception, certaines entreprises comme Intel ou Renault appliquent des taux de charge différents aux composants nouveaux et aux composants existants réutilisés. Cette incitation à réduire la diversité est judicieuse mais doit être utilisée avec circonspection dans une remise à plat effectuée dans le cadre de l'approche proposée ici.

3 Bibliographie

- [1] D. M. **Anderson**, J. **Pine II**, *Agile Product Development for Mass Customization : How to Develop and Deliver Products for Mass Customization, Niche Markets, JIT, Build-to-Order and Flexible Manufacturing*, McGraw-Hill, 1997.
- [2] C. Y. **Baldwin** & K. B. **Clark**, «Managing in an age of modularity», *Harvard Business Review*, septembre - octobre 1997, p. 84-93.
- [3] A. **Brooke**, D. **Kendrick** & A. **Meeraus**, *GAMS : A User's Guide*, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.
- [4] P. **Cohendet** & P. **Lléréna**, *Flexibilité, information, décision*, Economica, 1989.
- [5] F. **Danjou**, V. **Giard**, É. **Le Roy**, Analyse de la robustesse des ordonnancements/réordonnements sur ligne de production et d'assemblage dans l'industrie automobile. Cahier de recherche du GREGOR 1999.05 de l'IAE de Paris.
- [6] T. **Fouque**, *Impact de la réduction de la diversité des produits sur les stocks*, Thèse de doctorat de gestion soutenue à l'Université Paris - X, novembre 1997.
- [7] F. **Gautier**, V. **Giard**, *Evaluation économique des choix de conception d'un produit nouveau : l'impact sur les systèmes productifs*, communication soumise au congrès de l'AFC 2000.
- [8] V. **Giard**, *Analyse économique de la diversité en production*, papier de recherche G 90/2, 1990, Unité de Recherche Associée au CNRS 1257, IAE de Lyon.
- [9] V. **Giard**, *Processus productif et programmation linéaire*, Economica, 1998.
- [10] V. **Giard**, C. **Pellegrin**, «Fondements de l'évaluation économique dans les modèles économiques de gestion», *Revue Française de Gestion*, n°88, p. 18-31, 1992.
- [11] V. **Giard**, «Gestion de production : évaluation économique et prise de décision», *Revue Française de Gestion*, n° 67, p. 13-28, 1988.
- [12] V. **Giard** et C. **Triomphe**, *SIAD visant à définir les services offerts au personnel d'un centre de production et s'appuyant sur la programmation mathématique*, Cahier de recherche du GREGOR 1996.03 de l'IAE de Paris.

- [13] V. **Giard**, C. **Triomphe**, R. **André**, *Organist : un Système Interactif d'Aide à la Définition du niveau de traitement du courrier des bureaux de poste et des tournées d'acheminement à un centre de tri* Cahier de recherche du GREGOR 1997.06 de l'IAE de Paris (à paraître dans les *Cahiers Français du Génie Industriel*).
- [14] Eric **Jacquet-Lagrèze**, *Programmation Linéaire – Modélisation et mise en œuvre informatique*, Economica (collection PIQ), 1997.
- [15] M. H. **Meyer** & A. P. **Lehner**, *The power of product platforms - building value and cost leadership*, The Free Press, 1998.
- [16] F. **Murphy**, E. **Stohr** & A. **Asthana**, «Representation schemes for linear programming models», *Management Science*, vol. 38, n° 7, pp.964-991, juillet 1992.
- [17] S. Y. **Nof**, W. E. **Wilhelm** & H.-J. **Warnecke**, *Industrial assembly*, Chapman & Hall, 1997.
- [18] A. **Redford** & J. **Chal**, *Design for assembly : principles and practice*, Mac-Graw Hill, 1994.
- [19] R. **Reix**, «Flexibilité», in *Encyclopédie de gestion*, Y. Simon & P. Joffre, éditeurs, 2° édition, 1997.
- [20] J. B. **Revelle**, J. W. **Moran**, C. **Cox**, *The QFD Handbook*, Wiley, 1997.
- [21] R. E. **Rosenthal**, «Algebraic Modeling Languages for optimization», *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, S. I. Gass & C. M. Hyarris ed., Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.
- [22] P. G. **Smith** and D. G. **Reinertsen**, *Developing Products in Half the Time : new rules, new tools*, second édition, Wiley, 1998.
- [23] J.-C. **Tarondeau**, *Stratégie industrielle*, Vuibert, 1993.
- [24] J.-C. **Tarondeau**, *La flexibilité dans les entreprises*, PUF, 1999.
- [25] H. P. **Williams**, *Model Building in Mathematical Programming*, 3^e édition révisée, Wiley, 1993.

1999.13

**Analyse économique de la standardisation
des produits**

Vincent Giard

Professeur à l'IAE de Paris • Université *Panthéon - Sorbonne*

Les papiers de recherche du GREGOR sont accessibles
sur INTERNET à l'adresse suivante :

<http://panoramix.univ-paris1.fr/GREGOR/>

Secrétariat du GREGOR : Claudine DUCOURTIEUX (Ducourtieux.IAE@univ-paris1.fr)

