

Standardisation, commonalité, modularité une perspective économique globale

CLÉMENT CHATRAS^{1,2}, VINCENT GIARD¹

¹ PSL, UNIVERSITÉ PARIS-DAUPHINE, LAMSADE-UMR 7243
Place de Lattre de Tassigny F75775 Paris, France

² RENAULT SA, TECHNOCENTRE
1 avenue du Golf, F78084 Guyancourt, France

clement.chatras@renault.com, vincent.giard@dauphine.fr

Résumé - Cet article traite du problème de la standardisation simultanée d'un ensemble de modules et de plusieurs ensembles de composants susceptibles d'être combinés dans ces modules. L'objectif est une minimisation de coûts supportés sur les périodes à venir. Ces composants et modules, existants ou à créer, ne sont pas liés par des nomenclatures prédéterminées. Ce problème prend en compte les contraintes de couplage entre composants inclus dans un module, certaines d'entre elles pouvant être levées par des composants de jonction. Cette approche, facile d'implémentation, assure une cohérence décisionnelle que ne permettent des approches indépendantes de standardisation. Elle permet aussi de se rapprocher du niveau de détail utilisé dans les grandes entreprises pour effectuer leurs prévisions. Cette approche est illustrée par un exemple réel de grande dimension, d'un constructeur automobile.

Abstract - This paper deals with the problem of simultaneous standardization of a set of modules and of multiple sets of components that may be combined in these modules. The aim is to minimize future costs. The components and modules, whether already existing or yet to be created are not related to predetermined BOMs. The problem takes into account coupling constraints between components because not all components included in a module may be coupled (coupling restriction), although some of the restrictions can be lifted through "junction components". Our approach is readily implemented and significantly improves decisional consistency when compared to the standardization approaches that deal with the problem in isolation as opposed to globally. It also matches the level of detail used in large organizations for forecasting purposes. This approach is illustrated with a real case study of great dimension.

Mots clés - Standardisation, gestion de diversité, optimisation, conception de produit, définition de nomenclature.

Keywords - Standardization, management of diversity, optimization, product design, BOM definition.

1 INTRODUCTION

Le positionnement concurrentiel d'une entreprise manufacturière se fonde principalement sur la diversité des produits vendus permettant de « coller au plus près de la demande », ainsi que sur leurs caractéristiques de prix, de qualité et de disponibilité. Le prix de vente dépend du coût, lequel n'est pas indépendant de la diversité, une diversité accrue étant souvent une source d'accroissement des coûts. Dans le but de rester compétitives, les entreprises doivent mettre sous contrôle leur variété. La rationalisation de la conception des produits nouveaux peut permettre d'obtenir à moindre coût la diversité souhaitée par le client final (visible au travers un configurateur par exemple).

La **standardisation** est un processus visant à rationaliser la composition d'un ensemble de composants de caractéristiques différentes, appelés à satisfaire un ensemble de besoins de nature similaire (Rutenberg 1969, Fisher et al. 1999, Dupont et Cormier 2001, Perera et al. 1999, Baud-Lavigne et al. 2012...). On

qualifiera d'alternatifs ces composants (CAs) et cet ensemble, d'ensemble de composants alternatif (ECA). En général, au moment où ce processus est activé, un ECA existe déjà et peut être complété par un ensemble de composants à l'étude. Les caractéristiques fonctionnelles possédées par ces CAs sont de même nature que celles définissant les besoins, auxquels des demandes sont associées. Cet effort de rationalisation a généralement pour conséquence de limiter le nombre de composants et de réduire les coûts supportés pour répondre aux besoins à satisfaire. La standardisation est donc un processus majeur de l'amélioration de la compétitivité des entreprises, et plus particulièrement celles de la production de masse. En pratique la combinaison de CAs d'ECAs différents est contrainte par des restrictions techniques qui rendent non optimal les modèles standardisant un seul ECA, étant entendu que ces restrictions peuvent parfois être levées par l'utilisation de composants dits de jonction permettant de résoudre le problème d'interfaçage entre deux CAs.

Les **modules** sont des composants particuliers, combinant des CAs élémentaires appartenant à différents ECAs. Ces modules peuvent avoir une existence physique et être acheminés vers une usine d'assemblage, ou une existence virtuelle et voir le jour sur cette ligne. La standardisation peut donc intervenir au niveau des modules, des modules alternatifs (MAs) étant à choisir dans un ensemble de MAs (EMA). Les modules répondent à des besoins que l'on appellera **prestations**, les variantes de besoins appelées prestations alternatives (PAs) représentent la diversité des combinaisons de fonctions offertes au client au travers d'un configurateur web par exemple. L'ensemble de ces PAs doit être couvert par l'EMA considéré. L'introduction des modules permet d'utiliser les prévisions commerciales effectuées généralement au niveau des PAs qui seront à une maille agrégée permettant la définition de prévisions relativement fiables, répercutées au niveau des CAs qu'ils utilisent et qui constituent la source principale d'économie induite par la standardisation.

Un même CA peut être monté dans plusieurs MAs, conduisant à une **commonalité**, susceptible d'engendrer des économies d'échelle intéressantes. Dans ce contexte, la standardisation doit être menée conjointement au niveau des MAs et au niveau des CAs qu'ils comportent, étant entendu que les demandes des CAs sont tirées par celles des MAs retenus. Cet aspect est d'autant plus intéressant que les prévisions de demande ne peuvent s'effectuer qu'à un niveau agrégé et que, dans la perspective retenue ici, la nomenclature des MAs reste à définir. L'optimisation de la standardisation conjointe d'un EMA et de l'ensemble des ECAs qu'il inclut est le premier apport de cet article. Un second apport se situe au niveau des coûts en jeu dans cet arbitrage, on montrera comment ils peuvent tenir compte des dimensions temporelles et spatiales du problème.

On commencera par une analyse des écrits disponibles sur la standardisation, après en avoir délimité le périmètre (§2), ce qui permettra d'identifier quelques lacunes que nous nous proposons de combler. On présentera dans une seconde section la modélisation proposée en continuité des articles analysés et permettant de traiter le problème de standardisation conjointe des MAs et de leurs CAs (§3). On terminera par une conclusion, un exemple numérique étant proposé en annexe.

2 ANALYSE DE LA LITTÉRATURE

Cet article étant orienté vers la modélisation de la standardisation nous nous sommes focalisés sur les écrits proposant des méthodes prescriptives visant à réduire la diversité (§2.2). Quelques articles descriptifs, centrés sur les méthodes de gestion de la diversité, seront quand même analysés pour pouvoir traiter la définition fonctionnelle progressive des PAs, des MAs puis des CAs (§2.1).

2.1 Approches descriptives de la gestion de la diversité

La rationalisation de la diversité de CAs d'un ECA passe nécessairement par l'explicitation d'une liste de PAs associées. Les PAs comme les CAs se définissent par des niveaux de performance voulus ou atteints pour différentes fonctions (Fisher et al., 1999 ; Martin et Ishii, 2002 ; Fonte, 1994 ; Sered et Reich, 2006). Dès lors la standardisation nécessite, en amont de l'optimisation, une analyse fonctionnelle (Martin et Ishii, 2002 ; Fonte, 1994 ; Sered et Reich, 2006). Cette étape de la standardisation est trop souvent ignorée des travaux purement prescriptifs qui font généralement l'hypothèse de l'utilisation d'une seule fonction (Renard, 1877 ; Fisher et al., 1999 ; Lamothe

et al., 2006, etc.). Cette analyse fonctionnelle peut être faite en phase de conception d'une famille entière de produits (Martin et Ishii, 2002, Lamothe et al., 2006) ou en phase de conception d'un nouveau produit (Fisher et al., 1999) ou encore, en phase de production pour réduire la diversité (Renard, 1877). La prise en compte des PAs futurs est possible en phase de conception (Martin et Ishii, 2002). Martin et Ishii (2002) proposent une méthode d'analyse fonctionnelle basée sur les matrices QFD (*Quality Function Development*). Ils cherchent à faire une étude de sensibilité et d'interdépendance des fonctions pour différencier celles qui pourront donner lieu soit à des composants standards soit à des composants alternatifs (interface standard mais diversité de prestations) soit enfin à des composants autres.

Perera et al. (1999) distinguent 3 cas de standardisation en fonction du périmètre retenu :

- standardisation au sein d'un produit : plusieurs composants d'un même produit sont remplacés par un composant réutilisé n fois (moteurs électriques, par exemple) ;
- standardisation au sein d'une gamme : plusieurs composants utilisés chacun dans des produits différents sont remplacés par un composant commun aux n produits (système de climatisation, par exemple)
- standardisation dans le temps : le produit de la prochaine génération possédera des composants des produits de la génération présente.

Ils cherchent à étudier les effets de la standardisation sur les coûts tout au long du cycle de vie, en fonction de ces périmètres. Ils considèrent que l'augmentation de la commonalité induite par la standardisation génère des gains dans les coûts fixes et récurrents de chaque étape du cycle de vie, de la conception au recyclage. Ils identifient aussi un certain nombre de surcoûts comme l'augmentation du prix d'achat client pour certaines PAs, l'augmentation des frais de fonctionnement pour l'utilisateur sur le produit dont le composant est plus performant que nécessaire. Cet article propose une liste très pertinente des coûts à prendre en compte dans les démarches de standardisation. On peut noter que cette différence de périmètre a pour principal effet de modifier la définition de l'échéancier de demandes à satisfaire. On verra que notre approche permet de tenir compte sans problème de ces différents périmètres.

Par la suite on focalisera l'analyse de la littérature sur les travaux prescriptifs traitant de la standardisation de composants ou de modules ou des deux. Notre définition des modules est compatible avec celles trouvées dans la littérature de référence (Ulrich, 1995 ; Sanchez et Mahoney, 1996 ; Baldwin et Clark, 1997 ; Dahmus et al., 2001...) mais le problème étudié n'est pas ici celui de la définition d'une architecture modulaire optimale, que nous considérons comme déjà traité pour nous focaliser sur la définition de la diversité de MAs pertinente pour un EMA donné.

2.2 Approches prescriptives de la gestion de la diversité

Les articles traitant de manière prescriptive de la gestion de la diversité peuvent se rattacher à deux familles de problématiques : celle de la définition de modules permettant une différenciation retardée optimale ou celle d'une meilleure définition de composants standards (§ 2.2.1). Sans aucun doute, notre démarche s'inscrit dans le second courant, que l'on analysera plus en détail au § 2.2.2. Nous mettrons enfin en évidence un certain nombre de différences entre les approches prescriptives trouvées dans la littérature (§ 2.2.3), ce qui permettra de positionner clairement

notre apport. Un tableau de synthèse regroupant nos principales observations, est proposé à la fin de cette analyse de littérature.

2.2.1 Présentation des deux familles de problème de gestion de la diversité

L'analyse de la littérature met en évidence la coexistence de deux grandes problématiques :

- Dans le courant des travaux s'intéressant à la différenciation retardée, l'ensemble des ECAs et de leurs CAs sont connus, la question est de savoir quelle diversité optimale de MAs (vus comme des assemblages de composants) doit être gérée (Swaminathan et Tayur, 1998 ; Agard et Tollenaere, 2002 ; Rai et Allada, 2003 ; Agard et Penz, 2009 ; Baud-Lavigne et al., 2012 ; Agard et Bassetto, 2013). Les PAs sont directement des produits finis et la liste des composants de plus bas niveau constituant chacun d'eux est connue. Cette liste prédéterminée ne peut être changée ce qui empêche l'usage de composants meilleurs que nécessaire. Le but de ces démarches est alors de définir le niveau intermédiaire de chaque nomenclature en prenant en compte la qualité (Rai et Allada, 2003 ; Agard et Bassetto, 2013) ou le temps d'assemblage (Agard et Penz, 2009), plus que les coûts. Dans la plupart de ces articles, la définition des volumes de demande par PAs, nécessaire à l'optimisation économique, est arbitraire sinon absente. Dans cette classe de problèmes, la composition des ECAs utilisés pour constituer des modules, est donc prédéterminée et n'est pas susceptible d'être modifiée par l'introduction de nouveaux CAs. Cette perspective est éloignée des préoccupations de standardisation multiniveaux sur lesquelles cet article est centré.

- Le second courant, poursuivant les travaux fondateurs de Renard (1877), part d'un ensemble de PAs et d'un ensemble de composants susceptibles de les satisfaire. La question est de déterminer la diversité à coût minimal de cet ensemble, qui doit être utilisée et donc produite (Rutenberg, 1971 ; Dupont et Cormier, 2001 ; Fisher et al., 1999 ; Lamothe et al., 2006 ; Giard, 1999, 2001 ; Chatras et Giard, 2014). Ce questionnement peut alors intervenir à n'importe quelle phase du cycle de vie d'un produit ou d'un ensemble de produits. Ici, de façon claire, l'objectif est de trouver le meilleur compromis entre le coût d'une diversité trop importante de solutions adaptées précisément à la variété des PAs et le coût d'une solution sur-performante appliquée à toutes les PAs. Cette démarche est celle qui correspond à notre définition de la standardisation telle que proposée en introduction.

2.2.2 Présentation des principales approches prescriptives de la standardisation

Il est couramment admis que Renard (1877) est à l'origine d'une approche rationnelle de la standardisation. Sa présentation s'impose d'autant plus qu'un certain nombre de travaux récents s'inscrivent dans cette filiation. On s'attachera rapidement à présenter les travaux de Giard (1999, 2002) puis de Lamothe et al. (2006) qui présentent chacun des avancées significatives dans les problèmes de standardisation.

Renard (1877) semble être le premier à avoir rationalisé la diminution du nombre de CAs nécessaires pour faire face à une demande variée. Une seule caractéristique fonctionnelle f est prise en compte pour spécifier le besoin à satisfaire par un CA et une seule caractéristique technique q du CA est prise en compte ; dans le cas étudié par Renard, q est un diamètre de câble et f est la traction maximale avant rupture pouvant être supportée par ce câble. Une étude expérimentale permet d'établir que f est une

fonction monotone croissante de q . Renard propose de définir arbitrairement la variété, c'est-à-dire le nombre de CAs, en effectuant une partition de l'étendue des valeurs possibles de f en un nombre prédéterminé de plages dont les bornes supérieures sont en croissance géométrique. Trois reproches peuvent être formulés à l'encontre de cette approche, qui perdure avec un certain nombre de normes ISO : elle n'utilise qu'une seule caractéristique fonctionnelle, de nature continue ; le nombre optimal de CAs n'a pas de raison d'être prédéterminé ; aucun arbitrage économique n'intervient pour définir ce nombre de plages et leurs bornes, puisque cette approche ne prend pas en compte, ni la demande ni les coûts.

Fisher et al. (1999) enrichissent l'approche de Renard en retenant une définition économique du nombre optimal de composants, au prix d'hypothèses simplificatrices fortes. Les autres auteurs ne cherchent pas à dissocier la question de la définition du nombre optimal de variantes et la définition des caractéristiques de ces variantes. Ils cherchent plutôt à y répondre simultanément par une modélisation économique. La limite principale des travaux de Rutenberg (1971) et de Dupont et Cormier (2001) réside dans le fait qu'ils ne définissent pas de PAs, mais directement des produits finis. Cet angle d'attaque présente deux inconvénients majeurs. D'abord, la diversité des PAs peut être trop élevée en pratique, enfin, il est nécessaire, pour chacun de ces produits finis, d'établir l'ensemble des nomenclatures potentielles, permettant de les obtenir.

Une prise en compte explicite de plusieurs caractéristiques fonctionnelles et d'un arbitrage économique est proposée par Giard (1999, 2002). Les caractéristiques retenues peuvent être quantitatives (poids, puissance...) ou qualitatives (rattachement ou non à une norme...). Un tableau R croisant les CAs ($c = 1..C$) et les caractéristiques fonctionnelles ($f = 1..F$) de ces CAs existant ou à l'étude, peut être établi. L'élément R_{fc} peut alors correspondre à une valeur numérique ou à un attribut qualitatif (voir tableaux 1). L'inclusion de CAs à l'étude est liée à une perception de besoins à venir, susceptible de conditionner le bien-fondé des conclusions du processus de sélection. Il considère dans cet article qu'une PA est directement satisfaite par un CA, puisqu'il n'y a qu'un seul niveau de nomenclature. À chaque PA p ($p = 1..P$) est associée une demande d_p , ces PAs effectuant une partition de la demande. En l'absence de contraintes de production, une PA est satisfaite par un seul CA, car on a intérêt à faire appel au CA le moins cher pour satisfaire une PA et que tout panachage coûterait plus cher. Par contre, un CA peut satisfaire plusieurs PAs. L'analyse de ces PAs fait appel aux mêmes caractéristiques fonctionnelles que celles des CAs. Les caractéristiques quantitatives se définissent par des plages de valeurs et les caractéristiques qualitatives, par une liste d'attributs acceptables. Le tableau S décrit ($\rightarrow S_{pf}$) les conditions d'éligibilité d'un CA. La fonction de coûts proposée par Giard (1999, 2002) dans cette formulation du problème est une fonction monotone croissante, affine par morceaux, ce qui permet d'inclure des coûts fixes liés aux études et investissements associés au lancement de nouveaux CAs à l'étude. Elle inclut également des effets possibles de synergie positive ou négative induits par la production de plusieurs CAs sur un même site.

prévisions du type de celles utilisée en pratique par les directions commerciales. Enfin, il permet de prendre en compte une dynamique de la demande liée à un cycle de vie ou à l'introduction dans le futur de PAs nouvelles.

La prise en compte du temps dans ce type de décision est mentionnée comme une piste importante d'amélioration par Fisher et al. (1999), pourtant aucun papier ne semble véritablement traiter le problème. La dimension temporelle doit non seulement permettre de prendre en compte l'évolution de la demande des PAs actuelles, comme dans l'article de Lamothe et al. (2006), mais aussi l'apparition de nouvelles PAs, le délai de mise à disposition de composants nouveaux et la gestion des déphasages des cycles de vie de l'ensemble des produits d'une gamme (on ne développe généralement pas tous les produits d'une gamme en même temps). Notre modélisation propose une modélisation originale pour traiter ce problème.

La prise en compte des questions de localisation de chaîne logistique peut se faire de deux façons, soit en traitant séquentiellement les questions de conception de la chaîne de production et d'optimisation de la diversité, soit en traitant simultanément les deux questions. Certains chercheurs ont essayé de montrer la supériorité de l'approche simultanée (Lamothe et al., 2006 ; Baud-Lavigne et al., 2012). En fait, il n'est pas inutile de lister les questions posées par la conception de chaîne logistique car elles ne peuvent pas toutes être traitées avec le même horizon temporel. Trois composantes doivent être prises en compte dans les chaînes logistiques de grande dimension :

- Détermination des usines d'assemblage final et des marchés qui leur sont rattachés. Cette question est d'ordre stratégique, elle repose sur des critères macroéconomiques (droit du travail, accords politiques, imposition, douane...) et, de plus en plus, sur la mise en concurrence des sites de production d'un même groupe. Cette décision, prise avant même que la conception d'une nouvelle famille de produits débute, ne semble pas pouvoir être remise en cause, nous la considérons donc comme acquise dans cet article.

- Détermination des sites fournisseurs qui produiront les composants. Cette question est souvent gérée par des contrats. Classiquement dans le secteur automobile qui est au cœur de nos préoccupations, ces contrats sont généralement conclus pour 3 ans. La standardisation de composants doit donc tenir compte des durées de contrats, ou d'éventuelles pénalités financières de rupture de contrat. La prise en compte des contraintes est possible dans le cadre de l'approche proposée ici.

- Définition des incoterms et des routes d'approvisionnement de ces composants. Cette détermination est importante aussi car on peut imaginer une production délocalisée avec un magasin avancé fournisseur proche de l'usine qui sera alors considéré comme le site « livreur ». Bien qu'inscrite dans le contrat avec le fournisseur, ceci peut faire l'objet de négociation pendant la durée d'engagement.

Enfin aucun article n'intègre d'analyse de la standardisation simultanément sur deux niveaux de nomenclature pour traiter globalement la diversité d'un EMA et des ECAs que ces modules intègrent, première étape d'une approche pouvant aller au-delà de deux niveaux. Notre démarche vise à compléter aussi cette lacune dans une modélisation intégrant de manière plus directe et facile pour les opérationnels, l'ensemble des contraintes techniques et les composants de jonction permettant de lever certaines d'entre elles.

Le tableau 2 de la page suivante récapitule ces différences.

3 FORMULATION DU PROBLÈME DE LA STANDARDISATION

L'originalité de notre approche repose sur une approche économique élargie visant à sélectionner simultanément les MAs et les CAs qu'ils comportent afin de répondre à un ensemble de PAs, sans nomenclature prédéterminée et en intégrant la possibilité d'utiliser des composants de jonction pour lever, si cela est possible, l'interdiction de couplage de deux CAs appartenant à deux ECAs différents. Nous en expliquerons la logique générale (§3.1), avant de formaliser ce problème décisionnel par un programme linéaire (§3.2). Nous verrons ensuite comment intégrer les aspects temporels et spatiaux de ce problème dans la définition des coefficients de la fonction-objectif (§3.3). L'ensemble des notations utilisées a été synthétisé dans un tableau que l'on trouve dans les données de l'exemple téléchargeable (cf. § 4).

3.1 Description du problème décisionnel

Notre objectif est de définir la diversité économiquement optimale d'un EMA et de plusieurs ECAs mobilisés dans la fabrication des MAs. Notre modèle repose sur une définition multidimensionnelle des caractéristiques fonctionnelles des CAs (comme Giard 1999, 2002 l'avait introduit, cf. § 2.2.2). Comme tous les articles prescriptifs traitant de la standardisation, la définition de la diversité optimale de ces CAs se fait au regard de prestations alternatives. Les CAs comme les PAs sont définis par des caractéristiques fonctionnelles.

Dans le cadre d'une approche de standardisation, la définition fonctionnelle d'un système complexe se fait progressivement à partir d'une définition fonctionnelle commerciale et par décomposition jusqu'à atteindre un niveau de fonction élémentaire alors facilement traduisible en définitions techniques et organiques c'est-à-dire en composants. Les PAs ne peuvent donc pas être définies à une autre maille que celle agrégée de la définition fonctionnelle explicite pour le commerce. En effet, seul le département commercial est à même de proposer des prévisions fiables des demandes nécessaires à une analyse économique (Chatras et al. 2015 a & b). Une des limites importantes des démarches évoquées dans l'analyse de la littérature réside dans l'inadéquation entre d'une part, la maille de définition d'une PA suffisamment agrégée pour faire des prévisions de volume de demande fiables et, d'autre part, la maille de définition d'un CA. Notre apport sur ce point est alors de reprendre la démarche classique plus progressive en introduisant au moins un niveau intermédiaire de définition fonctionnelle entre les PAs et les CAs. Dans notre modélisation nous traiterons le cas d'un niveau supplémentaire qui apparaît comme une première étape vers une démarche plus générale, nous faisons l'hypothèse que ce niveau fonctionnel peut aussi être transcrit en définition technique aboutissant à la spécification de modules alternatifs. Notre apport est donc aussi de ne pas supposer connue une nomenclature (liste arborescente de MAs composés d'un CA dans chaque ECA) mais bien de la définir en optimisant la diversité des CAs et des MAs. L'introduction de MAs ne pose en pratique pas de problème car elle est en accord avec les définitions classiques des modules. On peut définir un système modulaire comme un ensemble de sous-systèmes c'est-à-dire de modules, plus petits qui peuvent être gérés (conçus et/ou fabriqués et/ou vendus) de façon indépendante (Baldwin et Clark 1997). Cette indépendance est obtenue par un découpage en amont ad hoc du système (propre à chaque système, à chaque organisation) (Baldwin et Clark 1997, Ulrich 1995) et à la définition d'interfaces « découplées » (Ulrich 1995) entre

modules. L'architecture modulaire par la génération de modules alternatifs, permet d'offrir de la personnalisation aux clients (Pine II 1993, Baldwin et Clark 1997). On peut définir un composant comme un sous-système séparable entrant dans la composition d'un système (Ulrich, 1995).

L'approche multi ECAs, telle que nous la formulons, prolonge nos précédents travaux (Chatras et Giard 2014). L'intérêt de cette modélisation réside à la fois dans la prise en compte de contraintes entre CAs appartenant à des ECAs différents mais aussi dans l'intégration de composants de jonction permettant de lever

parfois des incompatibilités d'interfaçage. Sanchez (1994) définit 5 types d'interfaces :

- interfaces d'accouplement (comment les éléments se connectent) ;
- interfaces de transmission (comment l'énergie est transmise) ;
- interfaces de pilotage (comment le signal est transmis) ;
- interfaces géométriques (liées aux contraintes d'encombrement et de localisation) ;
- interfaces d'environnement (liées à d'autres influences : thermiques, magnétiques, etc.).

Tableau 2. synthèse de notre analyse de littérature

Auteurs	Année	Prescriptif ou descriptif	Analyse fonctionnelle	Standardisation de composants	Définition de modules	Définition de la chaîne logistique	Positionnement dans le cycle de vie	Forme d'expression des PAS	maître de définition des PAS	Nbre de niveaux de nomenclature	Nbre de fonctions par CA	Nbre d'ECAs	modélisation économique	type de modélisation des coûts	contraintes	prise en compte du volume de demande	modélisation dynamique
Fonte	1994	Descriptif	X	X			conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	n	n	-	-	-	-	-
Martin et Ishii	2002	Descriptif	X	X	X		conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	1	n	n	-	-	-	Ratio par besoin	-
Sered et Reich	2006	Descriptif	X	X			conception de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	1	n	n	-	-	-	-	-
Perrera et al.	1999	Descriptif	X	X			tous	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Swaminathan et Tayur	1998	Prescriptif			X		vie série, production	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction affine	temps d'assemblage	non équiprobable	non
Agard Tollener	2002	Prescriptif			X		vie série, production	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	Coût fixe seul	temps d'assemblage	non équiprobable	non
Agard et Penz	2009	Prescriptif			X		vie série, production	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction linéaire	temps d'assemblage	non	non
Baude Lavigne et al.	2012	Prescriptif			X	X	conception de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	2	1	n	oui	fonction affine	-	c'est une variable	non
Agard et Bassetto	2013	Prescriptif			X	X	conception de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	2	1	n	oui	Proportionnel à la quantité	temps d'assemblage et qualité	oui supposé connu par produit fini	non
Renard	1877	Prescriptif		X			vie série, production	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	1	1	non	non	-	non	non
Fisher et al.	1999	Descriptif & Prescriptif		X			conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	1	1	oui mais que pour définir le nombre optimal de CAs	fonction affine	-	oui supposé connu par besoin	non
Rutenberg	1969	Prescriptif		X			conception de famille de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction affine	restriction à la libre combinaison des CAs	oui supposé connu par besoin	non
Dupond et Cormier	2001	Prescriptif		X			conception de famille de produits nouveaux	produits finis	liste des composants de plus bas niveau	1	1	n	oui	fonction concave	restriction à la libre combinaison des CAs	oui supposé connu par besoin	non
Giard	1999, 2001	Prescriptif	X	X			conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	précis, issu d'un cahier des charges de conception	1	n	1	oui	fonction affine par morceaux + synergies	restriction à la libre combinaison des CAs	Volume par besoin	non
Lamothe et al.	2006	Prescriptif		X	X	X	conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	1	1	n	oui	fonction affine	restriction à la libre combinaison des CAs	volume par besoin + hypothèse de coefficient de PBOM	oui
NOUS	2015	Prescriptif	X	X	X	(possible)	conception de famille de produits nouveaux	niveau de prestations par fonction	exprimable par le commerce	2	n	n	oui	fonction affine par morceaux + synergies	restriction à la libre combinaison des CAs	Volume par besoin + utilisation de la nomenclature	oui

3.2 Le modèle de base

Cette modélisation fait intervenir 4 types d'ensembles, celui des PAs, celui des MAs, celui des CAs et un ensemble complémentaire que l'on introduira ultérieurement, portant des composants de jonction permettant de « coupler » des CAs ne disposant pas d'une interface appropriée.

- L'ensemble des **prestations alternatives** comporte P PAs, indicées par p ($p=1..P$). À la prestation p est associée la demande d_p devant nécessairement être satisfaite par la solution retenue.

- L'ensemble des **modules alternatifs** comporte M MAs, indicés par m ($m=1..M$). Certains MAs peuvent ne pas pouvoir répondre aux besoins de certaines PAs. Le paramètre booléen a_{pm} vaut 1 si le MA m peut satisfaire la PA p et 0, dans le cas contraire (d'où le tableau de Booléens A). Un MA peut satisfaire plusieurs PAs. Au choix du MA m sont associés un coût fixe f_m , correspondant à des dépenses de développement et d'investissement, et un coût variable direct de production g_m .

- On distingue K ensembles de **composants alternatifs** (ECAs), indicés par k ($k=1..K$). L'ECA k comporte C_k composants alternatifs ($c_k=1..C_k$). Au choix du CA c_k de l'ECA k sont associés un coût fixe $w_{c_k}^k$, correspondant à des dépenses de développement et d'investissement, et un coût variable direct de production $v_{c_k}^k$. Lorsqu'il sera nécessaire de prendre en compte

simultanément deux ECAs, on utilisera les indices k_1 et k_2 . Un MA comporte nécessairement un CA pris dans chacun des ECAs. Un CA peut être monté dans plusieurs MAs. Certains CAs peuvent ne pas pouvoir être monté sur certains MAs. Le paramètre booléen $b_{mc_k}^k$ vaut 1 si le MA m peut utiliser le CA c_k de l'ECA k et 0, dans le cas contraire (d'où le tableau de Booléens B).

Notons x_{pm} la production du MA m destinée à satisfaire la PA p .

Cette **variable principale** n'est créée que si la prestation p peut être assurée par le module m ($\rightarrow a_{pm}=1$). La condition [1] garantit que la prestation p est nécessairement satisfaite par un module.

$$\sum_{m=1}^{m=M} x_{pm} = d_p, \forall p=1..P \quad [1]$$

La demande, éventuellement nulle, du module m est alors $\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$. Il est nécessaire de créer une **variable auxiliaire** y_m valant 1 si le MA m est retenu. Cette variable binaire est liée à la variable principale x_{pm} par la contrainte [2] dans laquelle la constante Ω correspond par exemple à une valeur très grande (par exemple ici $\sum_{p=1}^{p=P} d_p$). Cette contrainte est suffisante car la fonction de coût à minimiser intègre la variable y_m , pondéré par le coût fixe f_m .

$$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} \leq \Omega \cdot y_m, \forall m=1..M \quad [2]$$

Notons, $u_{mc_k}^k$ la production du CA c_k de l'ECA k utilisé dans la production du module m . Cette **variable principale** n'est créée que

si le CA c_k de l'ECA k peut être monté dans le module m ($\rightarrow b_{mc_k}^k=1$). La demande, éventuellement nulle, du CA c_k de l'ECA k est $\sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$. La condition [3] assure que la production du module m mobilise bien une quantité équivalente d'un CA dans chaque ECA.

$$\sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} u_{mc_k}^k = \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}, \forall m=1..M, \forall k=1..K \quad [3]$$

La **variable auxiliaire** $v_{mc_k}^k$, vaut 1 si le CA c_k de l'ECA k est utilisé par le module m . Elle est liée à la variable principale $u_{mc_k}^k$ par la contrainte [4].

$$u_{mc_k}^k \leq \Omega \cdot v_{mc_k}^k, \forall m=1..M, \forall k=1..K, \forall c_k=1..C_k \quad [4]$$

La contrainte [5] permet de garantir que le MA m utilise un seul CA dans chaque ECA.

$$\sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} v_{mc_k}^k = y_m, \forall m=1..M, \forall k=1..K \quad [5]$$

La **variable auxiliaire** $s_{c_k}^k$ vaut 1 si le CA c_k de l'ECA k est retenu par un ou plusieurs modules. Cette variable binaire est liée à la variable principale $u_{mc_k}^k$ par la contrainte [6]. Cette contrainte est suffisante parce que la fonction de coût à minimiser intègre cette variable $s_{c_k}^k$, pondérée par le coût fixe $w_{c_k}^k$.

$$\sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k \leq \Omega \cdot s_{c_k}^k, \forall k=1..K, c_k=1..C_k \quad [6]$$

La formulation précédente repose sur l'hypothèse implicite selon laquelle aucune contrainte ne limite les combinaisons possibles des CAs montés dans un module. Il est possible que les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ne puissent être assemblés dans un même module, notamment pour des raisons d'interfaçage. Cette **impossibilité de couplage** peut être matérialisée par le booléen $\lambda_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$, et valant 0 en l'absence d'interdiction, ce qui

conduit au tableau de Booléens $\Lambda^{k_1 \wedge k_2}$, à créer pour chaque couple d'ECAs dont les CAs peuvent être interfacés. Cette restriction se traduit par l'introduction la contrainte [7] générée pour les seules incompatibilités.

$$u_{mc_{k_1}}^{k_1} + u_{mc_{k_2}}^{k_2} \leq \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}, \forall m=1..M, \forall k_1=1..K, \forall k_2=1..K, \forall c_{k_1}=1..C_{k_1}, \forall c_{k_2}=1..C_{k_2} | k_2 \neq k_1 \wedge \lambda_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1 \quad [7]$$

Dans certains cas, l'impossibilité de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 peut être levée par l'utilisation d'un **composant de jonction** qui conduit à prendre en compte dans la fonction-objectif, d'un coût variable direct $\eta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$

et d'une charge fixe $\theta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$. Cette possibilité s'exprime par la valeur 1 attribuée au booléen $\gamma_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, lequel vaut 0 en cas du maintien d'impossibilité de couplage. Ceci conduit à l'utilisation de tableaux de booléens $\Gamma^{k_1 \wedge k_2}$ en complément des tableaux

$\Lambda^{k_1 \wedge k_2}$; ces tableaux sont tels que $\gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \leq \lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, le composant d'interfaçage venant lever une interdiction de couplage. Il faut alors créer la *variable principale* $\pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ représentant la demande en composant permettant de lever une interdiction de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 dans la création du module m choisi pour satisfaire la prestation p . Cette variable n'existe que si $\gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$. La demande totale de ce composant de jonction est $\sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$. Pour forcer $\pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ à prendre la valeur de la quantité produite du module m , si les CAs c_{k_1} et c_{k_2} sont retenus, il faut introduire la contrainte [8], conditionnée par l'existence de cette variable.

$$u_{mc_{k_1}}^{k_1} + u_{mc_{k_2}}^{k_2} \leq \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm} + \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \quad \forall m = 1..M, \forall k_1 = 1..K, \forall k_2 = 1..K, |k_2 \neq k_1 \wedge \gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1 \quad [8]$$

La contrainte [7] doit être alors remplacée par la contrainte [9].

$$u_{mc_{k_1}}^{k_1} + u_{mc_{k_2}}^{k_2} \leq \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}, \quad \forall m = 1..M, \forall k_1 = 1..K, \forall k_2 = 1..K, \forall c_{k_1} = 1..C_{k_1}, \forall c_{k_2} = 1..C_{k_2} | k_2 \neq k_1 \wedge \lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} + \gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1 \quad [9]$$

Il faut créer la *variable auxiliaire* $\rho_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ valant 1 si la solution requiert un composant de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 dans la création d'un module.

Cette variable binaire est liée à la variable principale $\pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ par la contrainte [10], suffisante parce que la fonction de coût à minimiser intègre la variable $\rho_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ pondérée par le coût fixe

$$\theta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \cdot \sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \leq \Omega \cdot \rho_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}, \quad \forall k_1 = 1..K, \forall k_2 = 1..K, \forall c_{k_1} = 1..C_{k_1}, \forall c_{k_2} = 1..C_{k_2} | k_2 \neq k_1 \wedge \gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1 \quad [10]$$

La *fonction-objectif*, à minimiser, est une somme pondérée de variables binaires, correspondant à une somme de charges fixes et de charges variables proportionnelles aux quantités à produire. On reviendra au §3.2.2 sur la définition des coefficients associés à ces variables binaires. Les trois charges fixes sont : celle induite par la sélection des MAs, $\sum_{m=1}^{m=M} f_m \cdot y_m$, celle induite par la sélection des CAs, $\sum_{k=1}^{k=K} \sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} w_{c_k}^k \cdot s_{c_k}^k$ et celle induite par la sélection des composants de jonction, $\sum_{k_1=1}^{k_1=K} \sum_{k_2=1, k_1 \neq k_2}^{k_2=K} \sum_{c_{k_1}=1}^{c_{k_1}=C_{k_1}} \sum_{c_{k_2}=1}^{c_{k_2}=C_{k_2}} \theta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \cdot \rho_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$.

Trois charges variables proportionnelles aux quantités produites doivent être ajoutées dans cette fonction de coûts à minimiser.

- La demande globale du MA m , $\sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$, est à pondérer par son coût variable direct g_m , d'où le coût partiel : $\sum_{m=1}^{m=M} g_m \sum_{p=1}^{p=P} x_{pm}$.

- La demande globale du CA c_k de l'ECA k , $\sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$, est à pondérer par son coût variable direct $v_{c_k}^k$, d'où le coût partiel :

$$\sum_{k=1}^{k=K} \sum_{c_k=1}^{c_k=C_k} v_{c_k}^k \cdot \sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k}^k$$

- Enfin, la demande globale du composant de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} , $\sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, est à pondérer par son coût variable direct $\eta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$, d'où le coût partiel

$$\sum_{k_1=1}^{k_1=K} \sum_{k_2=1, k_1 \neq k_2}^{k_2=K} \sum_{c_{k_1}=1}^{c_{k_1}=C_{k_1}} \sum_{c_{k_2}=1}^{c_{k_2}=C_{k_2}} \eta_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \cdot \sum_{m=1}^{m=M} \pi_{mc_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$$

Cette fonction de coûts est une fonction affine combinant, pour chaque référence retenue (CA ou MA), une dépense qui dépend du volume à produire, égal à la demande à satisfaire, et une charge fixe indépendante de ce volume. Il est possible, comme dans Giard (1999, 2002), de formuler le problème avec des fonctions de coûts plus complexes, de type « monotones croissantes, linéaire par partie » et d'intégrer l'impact de synergies positives ou négatives induites par la fabrication de plusieurs CAs sur un même site. Cette transformation du problème, facile à opérer mais non retenue ici, multiplie de manière importante le nombre de variables.

3.3 Composantes temporelles et spatiales de la fonction-objectif

Le modèle présenté est d'apparence statique mais il permet assez facilement d'intégrer l'évolution de la demande, qui n'intervient que sur les charges variables directes, et, moyennant une légère adaptation, il permet aussi de prendre en compte des dates de lancement de nouveaux CAs. Il intègre également une dimension spatiale, en permettant une prise en compte implicite de la localisation des sites productifs dans la chaîne logistique.

3.3.1 Composantes temporelles de la fonction-objectif

Les demandes des PAs déterminent celles des MAs et donc celles des CAs. La prise en compte de l'évolution temporelle de la demande conduit, d'une part, à remplacer d_p par d_{pt} , et donc

$$x_{pm} \text{ par } x_{pmt} \text{ et } u_{mc_k}^k \text{ par } u_{mc_k t}^k, \text{ associées aux périodes définies sur l'horizon retenu et à actualiser les coûts partiels de production avec un taux } \alpha \text{ d'actualisation périodique approprié. En l'absence de dérive des coûts variables directs, exprimés en monnaie constante, le coût variable direct actualisé du CA } c_k, \text{ est : } v_{c_k}^k \cdot \sum_{t=1}^{t=T} \sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k t}^k \cdot (1+\alpha)^{-t} \text{ et celui du MA } m, g_m \cdot \sum_{t=1}^{t=T} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$$

En posant $u_{mc_k}^k = \sum_{t=1}^{t=T} u_{mc_k t}^k \cdot (1+\alpha)^{-t}$, on retrouve la formulation initiale, ce qui se généralise immédiatement à tous les coûts variables directs de la fonction-objectif. Cette formulation implique une stabilité au cours du temps de l'affectation de la

production du CA c_k aux MAs qui l'utilise. On verra comment lever cette hypothèse, si nécessaire, lorsque l'on présentera la façon d'introduire dans la formulation du problème, des CAs ou MAs en cours d'étude. Pour le module m , ce même raisonnement conduit à poser $x_{pm} = \sum_{t=1}^{T-t} x_{pmt} \cdot (1+\alpha)^{-t}$. Le tableau 3 illustre cette démarche sur un exemple portant sur un MA, plus facile à présenter, avec un horizon de 5 ans et un taux d'actualisation de $\alpha = 10\%$. Le MA m est réputé être déjà en service (et non à l'étude), ce qui n'implique pas que les CAs qu'il utilise restent les mêmes. On suppose que ce MA m est utilisé par trois des PAs qui lui sont potentiellement liés ($a_{pm} = 1$), ce qui conduit aux productions non nulles x_{p_1mt} , x_{p_2mt} et x_{p_3mt} , égales aux demandes de ces PAs, en l'absence de contraintes productives.

Tableau 3. exemple d'utilisation des demandes actualisées dans la détermination des coefficients de la fonction-objectif

t	$x_{p_1mt} = d_{p_1t}$	$x_{p_2mt} = d_{p_2t}$	$x_{p_3mt} = d_{p_3t}$	$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}$	g_m	$g_m \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}$	$\frac{g_m \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{\sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$
5	8500	7200	5500	21200	0,51 €	10 812 €	6713,4	13163,3
4	7500	7000	4600	19100	0,51 €	9 741 €	6653,2	13045,6
3	8000	7500	4800	20300	0,51 €	10 353 €	7778,4	15251,7
2	7300	6800	4800	18900	0,51 €	9 639 €	7966,1	15619,8
1	7200	6600	4700	18500	0,51 €	9 435 €	8577,3	16818,2
Σ	38500	35100	24400	98000	-	49 980 €	37688,4	73898,8

$\frac{\sum_{t=1}^{t=5} g_m \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{g_m \sum_{t=1}^{t=5} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{\sum_{t=1}^{t=5} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$

Dans cette prise en compte du temps, trois remarques additionnelles doivent être faites.

- Cette prise en compte de l'évolution temporelle de la demande par une « demande actualisée » permet de traiter des demandes intervenant plus tard que la première année, par simple modification de la borne inférieure de la sommation. Cette possibilité est intéressante lorsque l'on s'intéresse à des prestations nouvelles ou à des prestations se substituant ultérieurement à des prestations actuelles (ce que l'on illustrera au tableau 4).

- Certains CAs (ou MAs) peuvent n'être qu'à l'étude, le développement du produit n'étant pas encore commencé. La charge fixe associée à la sélection de tels produits est alors une somme actualisée de ces dépenses de développement et, le cas échéant, d'investissement. La formulation du problème doit être modifiée puisque le CA c_k de l'ECA k supposé être à l'étude ne peut être monté dans un MA retenu pour satisfaire les besoins immédiats d'une ou plusieurs PAs. Ceci conduit nécessairement à scinder en deux les PAs susceptibles de mobiliser ce CA c_k , qui sont celles pour lesquelles le prédicat $a_{pm} = 1 \wedge b_{mc}^k = 1$ est vrai.

On notera p' et p'' les PAs remplaçant la PA p . Le tableau 4 introduit, par rapport au tableau 3, la possibilité de remplacer le module m_1 par un nouveau module m_2 , moins cher, à partir de la 3^e année. Ce module m_1 doit alors être remplacé par deux modules complémentaires m'_1 et m''_1 impliquant alors aussi la partition des PAs à l'origine de ces productions. Bien évidemment, la somme des charges variables directes actualisées des modules m'_1 et m''_1 est égale à la valeur actualisée des charges variables directes du module m_1 . Les besoins des 3 PAs initiales, dédoublées ici, peuvent être satisfaits par la solution mobilisant m'_1 et m_2 ou celle mobilisant m'_1 et m''_1 , ce qui revient à mobiliser l'ancien m_1 .

Cette prise en compte du temps ne change donc rien à la formulation analytique du problème de standardisation multiniveaux, elle ne joue que dans la définition des données utilisées et est à traiter en amont du processus d'optimisation.

Tableau 4. exemple d'utilisation des demandes actualisées dans la détermination des coefficients de la fonction-objectif

t	$x_{p_1mt} = d_{p_1t}$	$x_{p_2mt} = d_{p_2t}$	$x_{p_3mt} = d_{p_3t}$	$x_{p_4mt} = d_{p_4t}$	$x_{p_5mt} = d_{p_5t}$	$\sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}$	$\sum_{p=1}^{p=P} g_p x_{pmt}$	$\frac{\sum_{p=1}^{p=P} g_p x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{\sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{\sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$
5	8500	7200	5500	2200	5500	21200	10812	6713,4	13163,3	13163,3
4	7500	7000	4600	4600	4600	19100	9741	6653,2	13045,6	13045,6
3	8000	7500	4800	7500	4800	20300	10353	7778,4	15251,7	15251,7
2	7300	6800	4800	4800	4800	18900	9639	7966,1	15619,8	15619,8
1	7200	6600	4700	4700	4700	18500	9435	8577,3	16818,2	16818,2
Σ	14500	24000	13400	21700	14900	37400	60600	32438,0	41460,8	60600

$\frac{0,51 \cdot \sum_{t=1}^{t=5} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{0,51 \cdot \sum_{t=1}^{t=5} \sum_{p=1}^{p=P} x_{pmt}}{(1+0,1)^t}$	$\frac{32438,0 + 41460,8 - 73898,8}{16543,4}$	$\frac{21145,0}{16543,4 + 21145,0}$	$\frac{20315,8}{37688,4}$

Cette démarche de partition des demandes des PAs permet de lever facilement, si nécessaire, l'hypothèse simplificatrice d'un même MA couvrant tous les besoins d'une PA sur l'horizon économique retenu. Elle permet également de tenir compte facilement de changements rendus nécessaires à la suite d'une mise en œuvre progressive de nouvelles normes.

- La définition d'un horizon économique H pertinent présente des difficultés méthodologiques communes à toutes les analyses économiques de lancement de produits nouveaux (Giard, 1983, 2003 ; Gautier et Giard, 2000) ; elle ne sera donc pas traitée ici.

3.3.2 Composantes spatiales de la fonction-objectif

Les coefficients de la fonction-objectif comportent implicitement une *dimension spatiale* : la localisation des productions des CAs et des MAs détermine les coûts de production (Baud-Lavigne *et al.*, 2012). Si l'on suppose prédéterminées les localisations des lignes d'assemblage final et les productions qui leur sont assignées, les coûts d'acheminement final ne sont que peu impactés par les décisions à prendre. Le choix de MAs montés sur une usine d'assemblage peut avoir un impact sur le coût d'assemblage, intégré dans le coût variable direct ; si ce MA est monté sur plusieurs lignes d'assemblage, ce raisonnement n'est valide que si l'impact économique est voisin. Le choix de la localisation de l'usine de production d'un nouveau CA a un rôle important sur le coût variable direct qui intègre des coûts de production mais aussi des coûts d'acheminement des CAs aux lignes d'assemblage. Ce choix est relativement évident si cette décision n'est pas impactée par des décisions portant sur d'autres CAs pouvant être fabriqués sur le même site, en raison de synergies possibles. En cas de synergie, il faut modifier la formulation du problème, en y intégrant la problématique du design de la chaîne logistique. Cet aspect n'est pas pris en compte ici.

4 APPLICATION INDUSTRIELLE

Ce modèle a été appliqué à un cas réel rencontré chez un constructeur automobile. L'exemple retenu est celui du système de refroidissement moteur d'un véhicule automobile (voir figure 1). Les données utilisées s'appuient sur l'analyse liant les caractéristiques fonctionnelles des composants à celles requises par 390 PAs. Ce problème porte sur 178 MAs qui utilisent 3 ECAs : radiateurs (RAD), refroidisseur d'air de suralimentation (RAS) et groupe moto-ventilateur (GMV). Ces trois ensembles comportent respectivement 71, 40 et 61 CAs. Les CAs de deux ECAs pris parmi ces 3 ne se combinent pas tous librement. Les tableaux de booléens A et B comportent de l'ordre de 96% de valeurs nulles. Avec ce jeu de données, le modeler utilisé

(Xpress-IVE) a généré 11989 variables et 10499 contraintes, pour résoudre le problème posé en 3,5 secondes. [Le détail du problème et de sa solution est téléchargeable.](#)

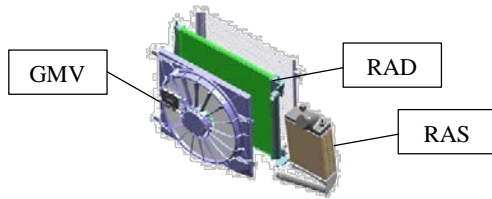


Figure 1 : Schéma d'un système de refroidissement de moteur

La solution obtenue montre une réduction forte de la diversité aux deux niveaux de nomenclature puisque nous passons de 178 MAs à 82, de 71 RAD à 24, de 40 RAS à 15 et de 61 GMV à 23. Cette solution optimale passe par l'utilisation de composants de jonction pour 8 couples (RAD, GMV) 2 couples (RAD, RAS) et 12 couples (RAS, GMV).

5 CONCLUSION

La démarche de standardisation multiniveau proposée présente plusieurs avantages par rapport aux démarches antérieures. Elle s'appuie sur un point de vue multifonctionnel pour définir les besoins (PAs), les MAs et les CAs, qui est facilement utilisable par les opérationnels. Elle permet une standardisation conjointe des MAs et de tous les CA des ECAs qu'ils incluent, tenant compte des incompatibilités d'interfaçage et de la possible utilisation de composants de jonction ; la nomenclature est un résultat de ce processus d'optimisation. Ces ensembles peuvent intégrer des composants (ou modules) existants mais aussi d'autres envisagés en conception. Notons aussi que le modèle proposé ici avec deux niveaux de nomenclature peut être généralisé en passant à un nombre de niveau de nomenclature supérieur. La définition des PAs peut s'effectuer à une maille suffisamment agrégée, celle utilisée par de nombreux configurateurs, pour que les prévisions de demande soient pertinentes. Enfin la modélisation économique permet de tenir compte de dimensions spatiales et temporelles, cruciales sur le terrain.

6 RÉFÉRENCES

Agard, Bruno, and Samuel Bassetto. 2013. "Modular Design of Product Families for Quality and Cost." *International Journal of Production Research* 51 (6): 1648–67.

Agard, Bruno, and Bernard Penz. 2009. "A Simulated Annealing Method Based on a Clustering Approach to Determine Bills of Materials for a Large Product Family." *International Journal of Production Economics* 117 (2): 389–401.

Agard, Bruno, and Michel Tollenaere. 2002. "Conception D'assemblages Pour La Customisation de Masse." *Mécanique & Industries* 3 (2): 113–19.

Baldwin, Carliss Young, and Kim B. Clark. 1997. "Managing in an Age of Modularity." *Harvard Business Review*.

Baud-Lavigne, Bertrand, Bruno Agard, and Bernard Penz. 2012. "Mutual Impacts of Product Standardization and Supply Chain Design." *International Journal of Production Economics* 135 (1): 50–60.

Chatras, Clément and Giard, Vincent. 2014. "Economic variety control and modularity". In ILS'5 conference in Breda, Netherlands

Chatras, Clément, Giard, Vincent and Sali, Mustapha. 2015 (a). "High

variety impacts on Bill of Materials Structure: Carmakers case study". In INCOM 2015, 15ième IFAC/IEEE/IFIP/IFORS Symposium Ottawa, Canada.

Chatras, Clément, Giard, Vincent and Sali, Mustapha. 2015 (b). "High variety impacts on Master Production Schedule: a case study from the automotive industry". In INCOM 2015, 15ième IFAC/IEEE/IFIP/IFORS Symposium Ottawa, Canada.

Dahmus, Jeffrey B., Javier Patricio Gonzalez-Zugasti, and Kevin N. Otto. 2001. "Modular Product Architecture." *Design Studies* 22 (5): 409–24.

Dupont, Lionel, and Gilles Cormier. 2001. "Standardisation D'une Famille Ordonnée de Composants Dont Le Coût D'obtention Est Concave." In MOSIM'01, 509–13.

Fisher, Marshall, Kamalini Ramdas, and Karl Ulrich. 1999. "Component Sharing in the Management of Product Variety: A Study of Automotive Braking Systems." *Management Science* 45 (3): 297–315.

Fonte, William Giacomo. 1994. "A de-Proliferation Methodology for the Automotive Industry." Massachusetts Institute of Technology.

Gautier Frédéric, Giard Vincent, 2000. Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux, *Comptabilité, Contrôle, Audit*, tome VI, Vol. 2, p. 43-75.

Giard Vincent, 1983, 1988, 2003. *Gestion de la production et des flux*, 3e ed., 1229 pages, Economica.

Giard, Vincent. 1999. "Analyse Économique de La Standardisation Des Produits." *Cahier de Recherche Du GREGOR*.

Giard, Vincent. 2001. "Economic analysis of product standardization", IFAC/IFIP/IEEE 2000, in (Binder ed.), Elsevier.

Lamothe, Jacques, Khaled Hadj-Hamou, and Michel Aldanondo. 2006. "An Optimization Model for Selecting a Product Family and Designing Its Supply Chain." *European Journal of Operational Research* 169 (3): 1030–47.

Martin, Mark V., and Kosuke Ishii. 2002. "Design for *Management and Control of Production and Logistic Variety*: Developing Standardized and Modularized Product Platform Architectures." *Research in Engineering Design* 13 (4): 213–35.

Perera, H. S. C, Nagen Nagarur, and Mario T Tabucanon. 1999. "Component Part Standardization: A Way to Reduce the Life-Cycle Costs of Products." *International Journal of Production Economics* 60–61 (April): 109–16.

Renard, Charles. ISO 3-1973, ISO 17-1973, SO 497-1973 and ANSI Z17.1-1973.

Rai, Rahul, and Venkat Allada. 2003. "Modular Product Family Design: Agent-Based Pareto-Optimization and Quality Loss Function-Based Post-Optimal Analysis." *International Journal of Production Research* 41 (17): 4075–98.

Rutenberg, David P. 1971. "Design Commonality to Reduce Multi-Item Inventory: Optimal Depth of a Product Line." *Operations Research* 19 (2): 491–509.

Sanchez, Ron, and Joseph T. Mahoney. 1996. "Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design." *Strategic Management Journal* 17 (S2): 63–76.

Sered, Yuval, and Yoram Reich. 2006. "Standardization and Modularization Driven by Minimizing Overall Process Effort." *Computer-Aided Design* 38 (5): 405–16.

Swaminathan, Jayashankar M., and Sridhar R. Tayur. 1998. "Managing Broader Product Lines through Delayed Differentiation Using Vanilla Boxes." *Management Science* 44 (12-part-2): S161–72.

Ulrich, Karl T. 1995. "The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm." *Research Policy* 24 (3): 419–40.