

CAHIER DU **LAMSADE**

363

Mai 2015

Standardisation, commonalité, modularité
une perspective économique globale

Clément Chatras, Vincent Giard

Standardisation, commonalité, modularité

une perspective économique globale

Clément Chatras^{1&2}, Vincent Giard¹

1. PSL, Paris-Dauphine University, LAMSADE-UMR 7243

Place de Lattre de Tassigny F75775 Paris

2. Renault SA, Technocentre

1 avenue du Golf, F78084 Guyancourt

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.

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

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.

2 Cahier du LAMSADE 363 Clément Chatras & Vincent Giard

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 couverts 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 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 focalisé sur les écrits proposant des méthodes **prescriptives** visant la réduction de diversité. Cette analyse exclut donc les papiers focalisés sur les méthodes de gestion de la diversité, de type descriptif (Martin et Ishii, 2002 ; Fonte, 1994 ; Sered et Reich, 2006 ; Perera *et al.*, 1999).

On se centrera donc sur les travaux cherchant à standardiser les composants ou les modules ou les deux. Notre définition des modules est compatible avec celles trouvées dans la littérature de référence (Ulrich, 1995 ; Sanchez and Mahoney, 1996 ; Baldwin and Clark, 1997 ; Dahmus and Otto, 2001...) mais le problème étudié n'est pas ici celui de la définition d'une architecture modulaire optimale, que nous considérons comme déjà traitée pour nous focaliser sur la définition de la diversité de MAs pertinente pour un EMA donné. Deux approches différentes coexistent dans les travaux prescriptifs.

- Dans le courant des travaux s'intéressant à la différenciation retardée, l'ensemble des ECAs et de leurs CAs est 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). Dans ces articles, l'angle d'attaque est plus celui d'une prise en compte de qualité ou du temps d'assemblage que d'une recherche de diminution de coûts. Dans cette classe de problèmes, la composition des ECAs, utilisés pour constituer des modules, est prédéterminée et n'est pas susceptible d'être modifiée par l'introduction de nouveaux CAs. Cette perspective est éloignée des préoccupations de standardisation multi-niveaux sur lesquelles ce papier est centré.

- Dans la seconde approche poursuivant les travaux fondateurs de Renard (1877), on part d'un ensemble de besoins et d'un ensemble de composants susceptibles de les satisfaire, la question est de déterminer la diversité à coût minimal de cet ensemble, doit être utilisée et donc produite (Rutenberg, 1971 ; Dupont et Cormier, 2001 ; Fisher *et al.*, 1999 ; Lamothe *et al.*, 2006 ; Giard, 1999, 2001, Chatras & 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 les coûts d'une diversité trop importante de solutions adaptées précisément à la variété des besoins et les ceux d'une solution sur-performante appliquée à tous les besoins. La définition d'un ECA est parfois implicite (Rutenberg, 1971 ; Dupont et Cormier, 2001 ; Lamothe *et al.*, 2006) car non lié à la définition de fonction permettant de définir les besoins et les composants. Lorsque l'ECA est explicite il est défini soit par une seule fonction (Renard, 1877 ; Fisher *et al.*, 1999) soit par plusieurs (Giard, 1999, 2001). D'un point de vue opérationnel il est clair que la définition d'un composant par plusieurs fonctions est à la fois plus pratique en terme d'analyse mais aussi en terme de définition des données d'entrée du modèle d'optimisation.

Dans les différents travaux que nous avons trouvé traitant de la standardisation telle que définie en introduction, certains chercheurs cherchent à standardiser simultanément plusieurs ECAs interdépendants (Rutenberg, 1971 ; Dupont et Cormier, 2001 ; Lamothe *et al.*, 2006) mais sans proposer, comme nous le ferons, des composants de jonctions additionnels permettant de lever certaines de ces restrictions moyennant un surcoût. Par ailleurs, aucun de ces articles n'intègre d'analyse de la standardisation simultanément sur deux niveaux de

nomenclature pour traiter globalement la diversité d'un EMAs et des ECAs que ces modules intègrent, première étape d'une approche pouvant aller au-delà de deux niveaux. Notre démarche vise à compléter 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.

La détermination de la demande par CAs est un des enjeux majeurs de la modélisation car la solution en dépend fortement (Fisher *et al.*, 1999 ; Baud-Lavigne *et al.*, 2012). Les démarches ne prenant pas en compte la demande dans la fonction-objectif ne semblent donc pas être complètement pertinentes d'un point de vue économique (Renard, 1877 ; Agard et Tollenaere, 2002 ; Agard et Penz, 2009). Les autres, sans exception, postulent un volume ou un pourcentage par besoin. Notre modèle permet d'améliorer la définition de la demande utilisée dans l'analyse économique de trois principales façons. Tout d'abord il apporte une cohérence des demandes à satisfaire par les MAs et les CAs sans faire appel à une nomenclature prédéterminée, la nomenclature étant un résultat de l'optimisation. Ensuite, l'usage de module permet de passer sur une maille de prévisions agrégées du type de celles faites par les commerciaux en pratique. 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 besoins nouveaux.

Dans les différents travaux que nous avons trouvé traitant de la standardisation telle que définie en introduction, certains chercheurs cherchent à standardiser simultanément plusieurs ECAs interdépendants (Rutenberg, 1971 ; Dupont et Cormier, 2001 ; Lamothe *et al.*, 2006) mais sans proposer, comme nous le ferons, des composants de jonctions additionnels permettant de lever certaines de ces restrictions moyennant un surcoût. Par ailleurs, aucun de ces articles n'intègre d'analyse de la standardisation simultanément sur deux niveaux de nomenclature pour traiter globalement la diversité d'un EMAs et des ECAs que ces modules intègrent, première étape d'une approche pouvant aller au-delà de deux niveaux. Notre démarche vise à compléter 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.

La détermination de la demande par CAs est un des enjeux majeurs de la modélisation car la solution en dépend fortement (Fisher *et al.*, 1999 ; Baud-Lavigne *et al.*, 2012). Les démarches ne prenant pas en compte la demande dans la fonction-objectif ne semblent donc pas être complètement pertinentes d'un point de vue économique (Renard, 1877 ; Agard et Tollenaere, 2002 ; Agard et Penz, 2009). Les autres, sans exception, postulent un volume ou un pourcentage par besoin. Notre modèle permet d'améliorer la définition de la demande utilisée dans l'analyse économique de trois principales façons. Tout d'abord il apporte une cohérence des demandes à satisfaire par les MAs et les CAs sans faire appel à une nomenclature prédéterminée, la nomenclature étant un résultat de l'optimisation. Ensuite, l'usage de module permet de passer sur une maille de prévisions agrégées du type de celles faites par les commerciaux en pratique.

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 besoins nouveaux.

3. Formulation du problème de la standardisation

Nous formaliserons le problème en deux temps. On analysera d'abord rapidement (§3.1) les modélisations que notre approche prolonge, ce qui permettra de préciser un certain nombre de concepts et d'introduire la démarche d'analyse. Ensuite (§3.2) nous développerons complètement la formalisation de notre modèle dans le cadre le plus général.

3.1 Modélisation de la standardisation restreinte à un ECA

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, en l'absence de prise en compte, dans le raisonnement, de la demande et des coûts.

Une prise en compte explicite de plusieurs caractéristiques fonctionnelles et d'un arbitrage économique est proposé 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} pouvant correspondre à une valeur numérique ou à un attribut qualitatif (voir tableaux 2). 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. Pour harmoniser la terminologie utilisée, on considère dans ce paragraphe qu'une PA est directement satisfaite par un CA, puisque l'on ne considère 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 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 combinaison des informations des tableaux R et S permet d'établir le tableau de booléens A qui indique si le CA c est ($A_{cp} = 1$) ou non ($A_{cp} = 0$) susceptible de répondre aux spécifications de la PA p . Pour traiter de manière optimale la sélection des CAs à utiliser, on introduit la variable binaire x_{cp} valant 1 si le CA c est utilisé pour satisfaire la prestation p ; bien évidemment, cette variable n'est à introduire que si $A_{cp} = 1$. La contrainte $\sum_c x_{cp} = 1$ garantit que chaque PA sera satisfaite par un seul CA. La demande totale du CA c est $\sum_p d_p \cdot x_{cp}$. La fonction de coût à minimiser fait intervenir des coûts de production des CAs ; si on se limite à des coûts variables directs w_c , la fonction objectif est $\sum_c w_c \cdot \sum_p d_p \cdot x_{cp}$.

La fonction de coûts proposée par Giard (1999, 2002) dans cette formulation du problème est plus complexe : il s'agit d'une fonction monotone croissante, linéaire par partie, 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.

Tableau 1 : exemple de définition fonctionnelle de 10 MAs, 14 PAs et la matrice de Booléens résultant du croisement de ces définitions

Caractéristiques fonctionnelles						Caractéristiques fonctionnelles requises						Demande (10 ³)	A _{cp}	Composant Alternatif (CA)											
														c=1	c=2	c=3	c=4	c=5	c=6	c=7	c=8	c=9	c=C=10		
R _{fc}	f=1 Puissance (hp DIN)	f=2 Clim. 1:man. 2:auto.	f=3 CO ₂ (g/km)	f=4 Poids (kg)	f=F=5 Euro.X	S _{pf}	f=1 Puissance (hp DIN)	f=2 Clim. 1:man. 2:auto.	f=3 CO ₂ (g/km)	f=4 Poids (kg)	f=F=5 Euro.X		p=1	1	1										
Composant Alternatif (CA)	c=1	75	1	90	160	5	p=1	≥ 65	1	≤ 92	≤ 163	≥ 5	60	p=1											
	c=2	90	1	105	160	5	p=2	≥ 80	1	≤ 107	≤ 160	≥ 4	40	p=2	1	1									
	c=3	90	1	90	160	6	p=3	≥ 90	1	≤ 108	≤ 171	≥ 5	20	p=3	1	1									
	c=4	110	1	110	170	5	p=4	≥ 90	1	≤ 93	≤ 160	≥ 6	20	p=4		1									
	c=5	110	2	110	170	5	p=5	≥ 90	1	≤ 104	≤ 170	≥ 6	90	p=5			1								
	c=6	120	2	110	170	5	p=6	≥ 105	1	≤ 115	≤ 175	≥ 5	52	p=6			1	1	1						
	c=7	130	1	120	200	5	p=7	≥ 110	1	≤ 110	≤ 186	≥ 5	49	p=7			1	1	1						
	c=8	150	1	160	180	5	p=8	≥ 110	2	≤ 135	≤ 200	≥ 4	8	p=8				1	1					1	
	c=9	130	2	140	200	5	p=9	≥ 115	1	≤ 143	≤ 185	≥ 4	40	p=9					1						
	c=C=10	130	2	120	170	6	p=10	≥ 115	1	≤ 125	≤ 205	≥ 5	12	p=10					1	1				1	
Prestation Alternative (PA)						p=11	≥ 130	1	≤ 150	≤ 200	≥ 5	5	p=11										1	1	
						p=12	≥ 150	1	≤ 160	≤ 180	≥ 4	92	p=12						1						
						p=13	≥ 130	2	≤ 185	≤ 220	≥ 4	26	p=13									1	1		
						p=P=14	≥ 130	1	≤ 125	≤ 170	≥ 6	2	p=P=14											1	

Cette approche souffre cependant de trois limitations importantes que l'on cherchera à lever dans le §3.2 : d'abord les ECAs sont supposés ici indépendants ce n'est guère réaliste (Chatras & Giard, 2014) ; ensuite définir les besoins et donc les demandes à la maille des composants est en pratique très difficile ; enfin ces approches ignorent largement les composantes spatiale (chaîne logistique) et temporelle (évolution des demandes et lancement éventuels de nouveaux composants) dans la fonction de coûts.

3.2 Modélisation de la standardisation conjointe d'un EMA et des ECAs inclus

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 (§3.2.1). Nous verrons comment intégrer les aspects temporels et spatiaux de ce problème dans la définition des coefficients de la fonction-objectif (§3.2.2). L'ensemble des notations utilisées dans cette modélisation est donné en annexe.

3.2.1 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.

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

La demande, éventuellement nulle, du module m est alors $\sum_{p=1}^{p=P} x_{mp}$. 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.

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

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.

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

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

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

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 composants 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 $\theta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$.

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

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 celles induites par la sélection des MAs, $\sum_{m=1}^{m=M} f_m \cdot y_m$, celles induites 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 celles induites par la sélection des composants de jonction, $\sum_{k_1=1}^{k_1=K_1} \sum_{k_2=1, k_1 \neq k_2}^{k_2=K_2} \sum_{c_{k_1}=1}^{c_{k_1}=C_{k_1}} \sum_{c_{k_2}=1}^{c_{k_2}=C_{k_2}} \theta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} \cdot \rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$.

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

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

- 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.

3.2.2 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, la prise en compte de dates de lancement de nouveaux CAs.

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 $u_{mc_k}^k$ par $u_{mc_k t}^k$, associées aux périodes définies dans l'horizon et à actualiser les coûts partiels de production avec un taux d'actualisation périodique approprié. En l'absence de dérive des coûts variables directs, exprimés en Euros constants, le coût partiel actualisé, par exemple pour CA c_k , est $v_{c_k}^k \cdot \sum_{t=1}^{t=T} \sum_{m=1}^{m=M} u_{mc_k t}^k \cdot (1 + \alpha)^{-t}$.

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. Trois remarques complémentaires 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.

- 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. Des contraintes doivent alors être respectées dans la formulation du problème puisque le CA à l'étude ne peut être monté dans un MA retenu pour satisfaire les besoins immédiats d'une ou plusieurs PAs. Ceci peut conduire à scinder certaines prestations en deux, les demandes de la

première étant définies avant l'arrivée du nouveau CA et, celles de la seconde, étant définies postérieurement. Ce problème de cohérence des données est à traiter en amont du processus d'optimisation.

- La définition d'un horizon économique H pertinent présente des difficultés méthodologiques communes à toutes les analyses économiques de lancement de produits nouveaux ; elle ne sera donc pas traitée ici.

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 leurs 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. Exemple numérique

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. 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 modèleur 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 ([Exemple](#)).

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 multi-niveau proposée présente plusieurs avantages par rapport aux démarches antérieures. Elle s'appuie sur un point de vue multi-fonctionnel 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 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. 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 temporelles cruciales sur le terrain.

4. Bibliographie

- Agard, Bruno, and Samuel Bassetto. 2013. "Modular Design of Product Families for Quality and Cost." *International Journal of Production Research* 51 (6): 1648–67. doi:10.1080/00207543.2012.693963.
- 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. doi:10.1016/j.ijpe.2008.12.004.
- 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. doi:10.1016/j.ijpe.2010.09.024.
- Chatras, Clément and Giard, Vincent. 2014. "Economic variety control and modularity". In ILS'5 conference in Breda, Netherlands
- 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. <http://www1.utt.fr/mosim01/pdf/ARTICLE-137.pdf>.
- 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*. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12064>.
- Giard, Vincent. 1999. "Analyse Économique de La Standardisation Des Produits." *Cahier de Recherche Du GREGOR*. <http://www.gregoriae.com/dmdocuments/1999-13.pdf>.

- Giard, Vincent. 2001. "Economical 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. doi:10.1016/j.ejor.2005.02.007.
- 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. doi:10.1016/S0925-5273(98)00179-0.
- Renard, Charles. See http://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Renard and the standards 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. doi:10.1016/j.cad.2005.11.005.
- 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.

Annexe - Tableau des paramètres et variables

SIGLES

PA	Prestation Alternative
MA	Module alternatif
CA	Composants Alternatifs
ECA	Ensemble de Composants Alternatifs

INDICES

p	Indice repérant une PA ($p = 1..P$)
m	Indice repérant un MA ($m = 1..M$)
k	Indice repérant un ECA ($k = 1..K$). Remarque : k_1 et k_2 si analyse conjointe de 2 ECAs
C_k	Nombre de CAs de l'ECA k
c_k	Indice ($c_k = 1..C_k$) repérant un CA dans l'ECA k . Remarque : c_{k_1} et c_{k_2} si analyse conjointe de 2 ECAs
t	Indice repérant la période ($t = 1..T$)

PARAMETRES TECHNIQUES

Ω	Constante arbitrairement élevée ($\Omega > \sum_{p=1}^{p=P} d_p$)
α	Taux d'actualisation périodique
a_{mp}	Paramètre binaire indiquant si la prestation p peut être satisfaite par le module m ($a_{mp} = 1$) $\rightarrow$ tableau A
$b_{mc_k}^k$	Paramètre binaire indiquant si le CA c_k de l'ECA k peut être monté dans le module m par le module m ($b_{mc_k}^k = 1$) $\rightarrow$ tableau B
$\lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Paramètre binaire tel que $\lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$ si les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ne peuvent être assemblés dans un même module $\rightarrow$ tableau $\Lambda^{k_1 \wedge k_2}$
$\gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Paramètre binaire tel que $\gamma_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$ si l'interdiction de couplage, dans un même module, des CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ($\lambda_{c_{k_1} c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2} = 1$), peut être levée par un composant de jonction $\rightarrow$ tableaux $\Gamma^{k_1 \wedge k_2}$
d_p	Demande à satisfaire de la PA p

VARIABLES

x_{pm}	Production du MA m destinée à satisfaire la PA p
y_m	Variable binaire auxiliaire =1 si le module m est produit (y_m liée à x_{pm} par [2])
$u_{mc_k}^k$	Production du CA c_k de l'ECA k utilisé dans la production du module m
$v_{mc_k}^k$	Variable binaire auxiliaire =1 si le CA c_k de l'ECA k est utilisé par le module m ($v_{mc_k}^k$ liée à $u_{mc_k}^k$ par [4])
$s_{c_k}^k$	Variable binaire auxiliaire =1 si le CA c_k de l'ECA k est utilisé par un ou plusieurs modules ($s_{c_k}^k$ liée à $u_{mc_k}^k$ par [6])
$\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Production du composants de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 pour produire le module m
$\rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Variable binaire auxiliaire =1 si un composants de jonction entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 ($\rho_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ liée à $\pi_{mc_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$ par [10])

COÛTS

g_m	Coût variable direct du module m
f_m	Coût fixe supporté si le module m est retenu
$v_{c_k}^k$	Coût variable direct du CA c_k de l'ECA k
$w_{c_k}^k$	Coût fixe supporté si le CA c_k de l'ECA k est retenu
$\eta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Coût variable direct du composant de jonction utilisé pour lever l'interdiction de couplage entre les CAs c_{k_1} et c_{k_2} appartenant aux ECAs k_1 et k_2 .
$\theta_{c_{k_1}c_{k_2}}^{k_1 \wedge k_2}$	Coût fixe supporté si l'interdiction 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