
Impacts d'une forte diversité sur la construction des nomenclatures et des plans directeurs de production

Clément Chatras^{1,3}, Vincent Giard¹, Mustapha Sali²

LAMSADE¹, DRM², Renault SAS³
PSL – Université Paris-Dauphine
Place de Lattre de Tassigny F75775 Paris, France
clement.chatras@renault.com
vincent.giard@dauphine.fr
mustapha.Sali@dauphine.fr

RÉSUMÉ. En production de masse fortement diversifiée, le très grand nombre de produits finis et les contraintes techniques et commerciales, limitant les combinaisons des composants alternatifs (CA) assurant la diversité, rendent très complexe la création, la maintenance et l'utilisation de l'ensemble des références de nomenclature associées à chacun des produits finis. Cette complexité explique que le client ne puisse définir sa demande à partir de CA et la difficulté d'établissement de prévisions commerciales au niveau des produits finis ou des CA. Depuis une vingtaine d'années, certains constructeurs automobiles utilisent une description originale des produits finis, qui ne semble pas avoir été théorisée. Elle décrit un produit fini par un ensemble de prestations alternatives, ce qui correspond à une vision fonctionnelle. Le passage à une description organique (CA) – incontournable pour l'établissement du plan directeur de production (PDP) et la production – s'obtient par le biais de prédicats. Cette approche est décrite et illustrée à partir d'un cas réel emprunté au secteur automobile. Elle répond aux besoins commerciaux et opérationnels mais pose de redoutables problèmes dans l'établissement du PDP au-delà de l'horizon gelé.

ABSTRACT. The creation, updating and pointing of the full set of the Bills of Materials corresponding to each end-product is extremely complex in a mass customization context, because of the great variety of both end products and components and the existence of commercial and technical constraints between the alternative components (AC) ensuring that variety. Customers can no longer define their product requirements by specifying a list of components and sales department cannot issue forecasts either at end-product or component level. Within the last two decades, to address these difficulties, some carmakers developed a new approach to describe products. This product description, which does not seem to have ever been theorized in the literature, is based on product market features through the concept of alternative services. The conversion to a physical Bill of Materials – that remain mandatory for the Master Production Schedule definition and for the production activities – is done through the use of predicates. In this paper we first develop this new approach and

then describe an application for drawing up MPSs, that is not straightforward beyond the frozen horizon.

MOTS-CLÉS : production de masse fortement diversifiée, nomenclature de planification, nomenclature générique, prestations alternatives, plan directeur de production, configurateur, production automobile.

KEYWORDS: mass customization, planning bill of materials, generic bill of materials, alternative services, master production schedule, automotive industry.

DOI:10.3166/JESA.49.55-91 © Lavoisier 2016

1. Introduction

En un demi-siècle, beaucoup d'entreprises sont passées de la production de masse à la production de masse fortement diversifiée pour coller au mieux aux attentes des clients. La variété offerte est alors largement supérieure au nombre annuel d'unités produites (Pil et Holweg, 2004). Cette variété des produits finis, considérée ici comme donnée, est obtenue par la combinaison de variantes de composants aboutissant, dans le cadre d'un produit fini « sophistiqué », à plusieurs milliers de composants différents pouvant être utilisés sur une ligne d'assemblage. On regroupe généralement les produits finis possédant une majorité de composants communs en une famille de produits que l'on appellera aussi modèle. La gestion de la diversité de produits d'une famille nécessite alors une gestion d'un grand nombre de composants alternatifs qui généralement ne se combinent pas librement.

Dans ce contexte de très grande diversité, considéré ici comme donné, cet article vise à décrire les problèmes méthodologiques d'établissement, d'archivage et d'utilisation des nomenclatures dans la prise de décisions opérationnelles et tactiques. Il expose les solutions à ces problèmes qu'il est possible d'exploiter. L'industrie automobile est un parfait exemple de ce contexte car une voiture est le fruit de l'assemblage d'un très grand nombre de composants et peu d'entreprises sont allées aussi loin dans l'application du principe de la production de masse fortement diversifiée (Anderson & Pine, 1997). Cet article s'appuie sur un cas réel pour illustrer à la fois les problèmes méthodologiques et leurs solutions associées dans un contexte de forte diversité.

La compréhension de la diversité d'une famille de produits que l'on peut produire sur une ligne d'assemblage est un préalable à l'analyse de ses conséquences sur l'organisation des nomenclatures (section 2). Ensuite, dans une revue de littérature, nous analysons la prise en compte de cette très grande diversité dans la structuration des nomenclatures (section 3). Un certain nombre d'améliorations de la structuration des nomenclatures ont été proposées par la communauté scientifique mais elles ne répondent cependant pas complètement aux besoins rencontrés par les responsables commerciaux et opérationnels. Quelques constructeurs ont traité ce problème en mettant en place une solution originale, basée sur une description fonctionnelle du produit. Celle-ci permet au client de choisir facilement le véhicule qu'il veut parmi les millions de véhicules possibles, et à ceux qui prennent des décisions opérationnelles (approvisionnements des lignes d'assemblage,

ordonnancement...), de retrouver la liste des CA utilisés par le véhicule. Dans la section 4 nous proposons une théorisation de cette approche. La construction des plans directeurs de production (PDP) s'appuie sur des prévisions effectuées par la direction commerciale, qui a nécessairement une vision du marché, exprimée en besoins fonctionnels correspondant aux prestations offertes aux clients. Le passage de ces prévisions à des prévisions portant sur des composants à approvisionner pose de redoutables problèmes méthodologiques. Deux approches sont possibles, sans qu'aucune d'elles ne puisse répondre de manière indiscutable à ces problèmes (section 5).

2. Analyse de la diversité offerte en production de masse fortement diversifiée

Une famille de produits finis peut se définir comme un ensemble de produits finis destinés à satisfaire des besoins globalement proches et partageant un très grand nombre de composants identiques. La diversité des produits de cette famille s'obtient, sur une ligne d'assemblage, par la combinaison de composants optionnels ou alternatifs, à laquelle s'ajoutent quelques rares opérations physiques directes de différenciation (peinture...). La construction de la diversité d'une famille de produits par combinaison de composants alternatifs conduit à une structure modulaire du produit. Ces deux hypothèses rarement explicitées mais communément admises dans les articles traitant des nomenclatures (Mather, 1986 ; Tallon, 1989 ; Hegge, 1992 ; Olsen *et al.*, 1996 ; Bertrand *et al.*, 2000) sont concrètement vérifiées dans le secteur automobile de notre cas d'étude.

Du point de vue de la production, un composant alternatif (CA) correspond à l'une des variantes d'un ensemble de composants alternatifs (ECA) susceptibles d'être montés dans un même poste d'une ligne d'assemblage. Ces variantes peuvent se différencier par leur technologie (moteur...), leur design (jantes...) ou l'ajout de fonctions supplémentaires (lecteur CD dans un poste radio...). Un composant optionnel (barres de toit, radars de recul, ordinateur de bord...) est un cas particulier de CA d'un ECA décrivant la présence ou l'absence du composant optionnel. L'alternative implicite à la variante optionnelle peut être un objet physique (bouclier sans radar de recul...) ou rien du tout (absence de barre de toit, absence d'ordinateur de bord). Dans la suite, on ne parlera que de CA et d'ECA, puisque ces concepts permettent de traiter également le cas de composants optionnels. Bien évidemment, les produits finis intègrent également un ensemble de composants systématiquement montés, mais ceux-là n'ont pas d'impact dans l'analyse de la diversité. Ceci conduit à distinguer deux catégories de composants, ce que la figure 1 schématise à partir d'un sous-ensemble d'ECA. La partie de la nomenclature décrivant les composants systématiquement montés ne posant aucun problème, notre analyse ne s'intéresse ici qu'à celle qui traite des CA qui définissent l'identité du produit désiré par un client.

Au travers des informations commerciales dont il dispose, le client ne peut pas avoir conscience de la diversité sous-jacente du véhicule qu'il envisage d'acheter ; il ne peut percevoir que celle d'un sous-ensemble d'ECA qui dépend de sa culture technique. En outre, un certain nombre de CA, moins connus des clients, comme les faisceaux électriques et les alternateurs, sont liés indirectement à certains de ses

choix comme ceux portant sur les équipements électriques (climatiseur, moteurs des toits ouvrants, rétroviseurs, lève-vitres...).

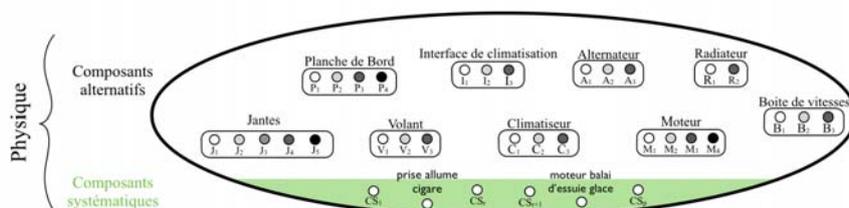


Figure 1. Illustration de quelques composants utilisés dans une production de masse fortement diversifiée

Cette analyse de la variété produite doit prendre en compte non seulement l'évolution de la définition technique des produits mais aussi de l'existence de particularismes des marchés sur lesquels les produits sont vendus et d'éventuelles différences d'organisation d'usines d'assemblage géographiquement distinctes. Ces facteurs, généralement éludés dans les travaux de mesure de la diversité, compliquent la définition des nomenclatures, leur maintenance et leur usage.

– L'offre commerciale d'un modèle varie d'une région commerciale à une autre. Une région commerciale correspond à un pays (Allemagne, Grande Bretagne...) ou à un ensemble de pays (ex : France/Belgique/Luxembourg/Suisse). Ces offres commerciales se recouvrent très largement mais chaque région peut proposer des CA particuliers pour répondre à des caractéristiques spécifiques d'un marché ou pour tenir compte de contraintes réglementaires locales : les conducteurs britanniques doivent disposer d'une « conduite à droite » ; les normes antipollution allemandes sont plus sévères que les françaises ; le toit en toile n'est disponible qu'en Allemagne et l'option fumeur, qu'en Grande-Bretagne. Une ligne d'assemblage a généralement pour vocation de produire les véhicules d'une même famille demandés par plusieurs régions. Ceci implique que, dans la nomenclature, chaque ECA inclut les CA utilisés par toutes les régions approvisionnées par cette ligne d'assemblage. Par exemple, l'ECA « toit de la Twingo » doit comporter les CA « toit en tôle », « toit ouvrant électrique » et « toit en toile », ce qui découle d'une consolidation des ECA des configurateurs français et allemand. Concrètement les diversités que produisent deux usines différentes assemblant une même famille de produits peuvent être différentes mais, au niveau de l'entreprise, il faut travailler sur la « consolidation » des diversités régionales.

– L'organisation de la production peut également avoir un impact à prendre en compte dans la définition des nomenclatures ; cela est notamment perceptible lorsqu'une même famille de véhicules est produite sur plusieurs sites industriels. En effet, pour reprendre la terminologie de la MRP, un véhicule produit sur une ligne d'assemblage correspond à une référence de niveau 0 laquelle est assemblée sur cette ligne à partir de composants de niveau 1, qu'ils soient systématiques ou choisis

dans un ECA. Les CA d'un ECA sont repérés par une référence de nomenclature ; il peut s'agir d'une nomenclature fantôme si ces CA sont fabriqués sur une ligne de production asservie à la ligne d'assemblage qu'elle alimente, sans stock intermédiaire au poste où les CA sont montés. Cette convention permet à la diversité d'une famille fabriquée sur plusieurs lignes, d'être indépendante de l'organisation industrielle choisie (production synchrone, approvisionnement synchrone...). Reste le cas de figure où deux lignes d'assemblage dédiées à la production d'une même famille n'adoptent pas la même logique de différenciation retardée. Par exemple, une première usine peut monter un CA composé d'un moteur couplé à sa boîte de vitesses, tandis qu'une autre usine reçoit un moteur sur un premier poste de la ligne, qu'il couple ensuite à une boîte de vitesses sur un poste suivant de la ligne. Dans ce cas, il faut envisager de lier les nomenclatures aux sites industriels de production. Dans la suite on ne tiendra pas compte de cette situation.

– Les caractéristiques de l'offre commerciale varient au cours du temps pour trois raisons. Tout d'abord, le rajeunissement d'une gamme peut conduire au remplacement de certains CA. Ensuite, la Direction Commerciale fait évoluer régulièrement son offre par modification des combinaisons possibles des CA existants ; par exemple, il peut être décidé qu'à partir d'une certaine date et pour un certain niveau d'équipement, une climatisation optionnelle devient « de série ». Enfin, certains CA peuvent être remplacés par d'autres, pour des raisons d'optimisation de coût ou de qualité. Les nomenclatures de production doivent répercuter ces trois types de changement et la description de la diversité offerte par un ensemble de nomenclatures n'est donc valable qu'à partir d'une date « et jusqu'à nouvel ordre ». Cette évolution au cours du temps est repérée dans la littérature par le concept de diversité dynamique (Pil et Holweg, 2004). Dans la suite, on ne tiendra pas compte de ces aspects temporels.

À ce stade, il semble important d'illustrer l'impact de cette diversité sur la production. Une analyse de la diversité menée sur l'une de ses lignes d'assemblage final de Renault montre que quelque 700 composants systématiques et autant d'ECA, sont requis pour assembler un véhicule. Ces 700 ECA se déclinent en 1 900 CA environ. La moitié de ces ECA sont composés de CA dont la valeur est inférieure à 4 € ; ce choix, arbitraire, de la médiane donne une idée de l'importance numérique du nombre de CA dont l'approvisionnement peut être déconnecté des PDPs. Le fait que ce nombre d'ECA soit très supérieur au nombre de postes de la ligne d'assemblage montant des CA signifie qu'un poste assure le montage de CA appartenant à plusieurs ECA. Pour illustrer ce point, prenons l'exemple du poste qui monte les jantes d'un véhicule : ce poste utilisera au montage, des écrous qui dépendent de la référence de jante à monter. Toujours pour donner des ordres de grandeur, la nomenclature associée à une ligne d'assemblage dédiée à un modèle donné est modifiée au rythme moyen de quelques dizaines de références par mois, pour toutes les raisons évoquées précédemment. Pour terminer, indiquons que cette analyse montre que deux usines fabriquant le même modèle ont, en moyenne, des nomenclatures à 80 % identiques.

Parallèlement à l'accroissement de la diversité offerte, la mondialisation des chaînes logistiques en réponse à une concurrence devenue mondiale, a provoqué un

allongement des délais d'approvisionnement. Cette double évolution pose deux problèmes méthodologiques nouveaux, auxquels les réponses apportées peuvent varier. Le premier est relatif à la définition des nomenclatures, devenue difficile en raison du très grand nombre de produits finis qu'il est possible de produire et des contraintes interdisant une libre combinaison des composants alternatifs. En section 2 nous analysons la littérature s'intéressant à cette problématique, ce qui nous permet en section 3 de présenter notre théorisation d'une solution déjà opérationnelle. Le second problème, induit à la fois par le problème de définition des nomenclatures et par l'allongement des délais d'obtention dans la chaîne logistique, porte sur l'établissement des PDP des usines d'assemblage final mais aussi ceux des usines situées en amont dans la SC, ce que l'on examine en section 4.

3. Analyse de la littérature

La nomenclature décrit de manière non équivoque (Garwood, 1995) la composition des produits finis pour tous les services de l'entreprise (production, bureaux d'études et des méthodes, service commercial, services gestionnaires de l'après-vente). La nomenclature de production définit la liste et la quantité de tous les composants utilisés par un processus de production et/ou d'assemblage pour fabriquer un produit fini donné. Les autres nomenclatures, créées pour répondre à des besoins spécifiques, sont dérivées de cette nomenclature de production.

L'analyse de la littérature montre un consensus sur le fait que lorsque la diversité de produits finis est trop importante il n'est plus possible de définir et de stocker les nomenclatures de l'ensemble des produits finis fabricables (Orlicky, 1972 ; Mather, 1986 ; Erens et Wortmann 1994 ; Olsen et Saetre 1997, etc.). Différentes approches ont alors été développées pour éviter ou limiter la redondance d'information dans les nomenclatures. La plus connue est sans doute la nomenclature modulaire, nous la détaillerons au §3.1. Dans les secteurs proposant une très forte diversité de produits à forte valeur, les organisations ont mis en place des processus d'assemblage ou de fabrication à la commande (Erens et Hegge, 1994 ; Olsen *et al.*, 1997). Ces démarches s'accompagnent mécaniquement par la nécessité pour le client de définir le produit qu'il veut au lieu de choisir parmi une liste de produits proposés. Lorsque le produit est « simple », c'est-à-dire lorsqu'il résulte de l'assemblage de peu de sous-systèmes n'ayant entre eux aucune contrainte, le client définit généralement le produit qu'il veut par la liste de ces composants (Erens et Hegge, 1994 ; Olsen *et al.* 1997). En revanche, lorsque le produit est « complexe », c'est-à-dire lorsqu'il résulte de l'assemblage d'un grand nombre de composants non indépendants, le client décrit le produit qu'il veut par une liste de fonctionnalité, ou de prestations de services généralement à l'aide d'un configurateur. La littérature développe ce concept sous différentes appellations : *parameters* pour Hegge et Wortmann (1991), *features* pour Hegge (1992), *functional features* pour Bertrand *et al.* (2000), *commercial parameters* pour Erens et Wortmann (1996), etc. Ces prestations ont l'avantage d'être explicites d'un point de vue commercial mais nécessitent une interprétation pour que le produit soit fabriqué (Hegge et Wortmann, 1991). Dès lors, il est nécessaire de définir une nomenclature permettant de faire le lien entre la définition

fonctionnelle du produit (par un ensemble de prestations de services) et la définition organique du produit (par un ensemble de composants) qui reste nécessaire à des fins de planification et de fabrication (Erens *et al.*, 1994 ; Erens et Wortmann, 1996). Depuis les années quatre-vingt-dix, les chercheurs ont développé à cette fin le concept de nomenclature générique que nous détaillerons au § 3.2.

Une très grande variété des produits finis, combinée à d'importantes restrictions pesant sur la libre combinaison des composants alternatifs, pose techniquement deux problèmes : celui de la création – et de l'intérêt – de la liste exhaustive des nomenclatures des produits que l'on peut fabriquer et celui du pointage de l'identifiant de nomenclature correspondant à la demande d'un client lors de l'expression de sa demande ou lors de sa mise en production. Nous focaliserons notre analyse de la littérature sur les articles traitant de la représentation d'une forte diversité de produits dans les nomenclatures à des fins de définition de produits et/ou de planification et d'ordonnancement. Les articles traitant de la gamme ou de l'intérêt à fusionner la nomenclature et la gamme n'ont donc pas été retenus ici (Jiao *et al.*, 2000 ; Zang *et al.*, 2013 ; etc.). Notre analyse fait ressortir une évolution progressive de la structuration de nomenclature au fil des travaux. Cela nous permet de positionner clairement la théorisation de la démarche de certains constructeurs automobiles que nous proposons en section 4. Cette analyse de la littérature s'achèvera (§ 3.3) par un tableau de synthèse et un diagnostic sur les possibilités d'application des solutions proposées aux besoins opérationnels et tactiques des entreprises orientées vers une production de masse de produits fortement diversifiés, comme celles de l'industrie automobile.

3.1 Nomenclature modulaire

Une solution au problème posé de représentation de famille de produits utilisant le choix d'un CA parmi un SAC a été rapidement proposée avec l'introduction de nomenclature modulaire. Cette structuration de la nomenclature a historiquement été utilisée pour structurer la nomenclature de MRP avec le concept de nomenclature de planification. Les nomenclatures de planification est une méthode de planification basée sur la structure de la nomenclature modulaire. Les nomenclatures de planifications utilisent des coefficients de prévisions qui sont des ratios prévisionnels qui définissent le mix espéré entre les CA de chaque ECA (Orlicky *et al.*, 1972 ; Mather, 1986 ; Rush et Barder 1988 ; Stonebraker, 1996). Le principe en est simple ; la nomenclature d'un produit fini utilise les références des composants systématiquement montés et des références de composants fictifs correspondant aux ECA utilisés par la ligne de montage. Que ces références soient réelles ou fictives, un coefficient de nomenclature est utilisé ; par exemple, on monte toujours quatre jantes identiques sur un véhicule, plusieurs jantes différentes étant susceptibles d'être utilisées dans un ensemble de modèles de jantes (ECA) représenté par un composant fictif. Chaque composant fictif pointe à son tour sur les CA de l'ensemble concerné. Pour définir exactement le produit à assembler, un seul de ces CA est sélectionné, opération à réaliser pour tous les ECA concernés sur la ligne de montage.

L'intérêt des nomenclatures modulaires est double. D'abord, pour la modélisation des familles de produits, elles permettent d'éviter au maximum la redondance d'information (Tallon, 1989 ; Hegge et Wortmann, 1991). Ensuite, pour la planification, elles proposent une structure à partir de laquelle les nomenclatures de planification simplifient la définition des approvisionnements au-delà de l'horizon gelé. À titre d'illustration, la figure 2, tirée de Hegge et Wortmann (1991), représente la nomenclature modulaire d'une famille de chaises de bureau dont la diversité n'est due qu'à la couleur. Dans cet exemple, les CA sont le module Rouge et le module Bleu, ils définissent un ECA virtuel qui n'est pas représenté ici.

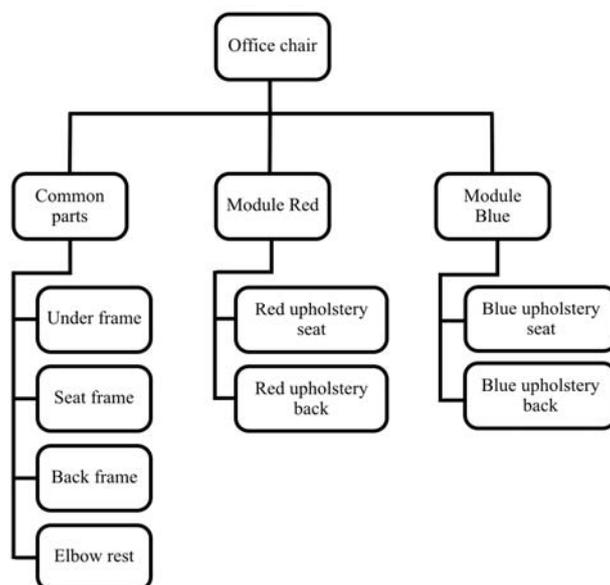


Figure 2. Exemple de nomenclature modulaire
(tiré de Hegge et Wortmann, 1991)

Dans ce contexte, la description d'un produit fini dans une base de données relationnelle (Chrisment *et al.*, 2008 ; Date, 2012) est relativement simple. Les ECA correspondent à des types d'entités dont les entités sont des CA de ces ECA. Dans les nomenclatures modulaires, les composants systématiques peuvent être synthétisés par un kit représenté par un seul type d'entité particulier ne possédant qu'une entité. La nomenclature d'un produit fini peut se décrire alors par une association mettant en jeu tous les types d'entités de la famille de véhicules, la clé de cette association concaténant celles des entités retenues. Le pointage d'un produit unique, nécessaire pour le passage d'une commande par exemple, passe donc par l'explicitation de toutes les références des CA choisis dans chaque ECA. Cela ne pose pas de gros problèmes tant qu'il existe peu de contraintes à la libre combinaison de CA appartenant à des ECA différents (van Veen et Wortmann, 1992, Albas *et al.* 2012) et que le nombre d'ECA n'est pas trop grand.

Ces contraintes entre CA ont une origine technique ou commerciale. Dans le premier cas, il s'agit de prendre en compte soit des contraintes physiques d'interaction entre des composants (contraintes d'interfaçage, de volumétrie ou de performance) soit les conséquences des choix d'optimisation de politiques achats (par exemple, un rabais plus important peut être obtenu en standardisant un CA dans un ECA non visible du client). Les contraintes commerciales ont pour but de rendre cohérente la montée en gamme d'un modèle et d'éviter la cannibalisation entre les modèles de la gamme. Elles peuvent exprimer une logique de *pack* (association obligatoire de fonctionnalités) ou d'exclusion. La Figure 3 complète la Figure 1 en mettant en évidence le rôle respectif des contraintes commerciales et techniques, sur un exemple réel.

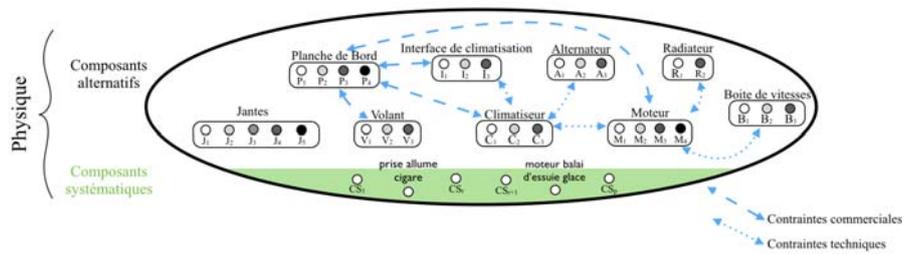


Figure 3. Mise en évidence de contraintes techniques et commerciales entre ECA

Pour illustrer la complexité de la prise en compte de ces contraintes, nous allons nous appuyer sur la simplification d'un cas réel d'un modèle de véhicule offrant une diversité basée sur quatre moteurs (M_1 , M_2 , M_3 et M_4), deux radiateurs (R_1 et R_2), trois alternateurs (A_1 , A_2 et A_3), trois climatiseurs (C_1 , C_2 et C_3) et trois Interfaces de climatisation (I_1 , I_2 et I_3). Si l'on fait abstraction des composants systématiques et des autres ECA et si l'on suppose une libre combinaison de ces CA, on obtient $4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 = 216$ véhicules possibles. La

Figure 4, qui se lit du bas vers le haut et qui correspond au graphe des clés des bases de données relationnelles, illustre la prise en compte progressive des contraintes effectivement observées entre CA (cette propagation étant visualisée par un réseau de flèches pour les restrictions à la libre combinaison de l'alternateur A_1). Les interdictions de combinaison des associations de niveau n (représentées par des « * ») sont héritées par celles du niveau $n+1$ (représentées par des « . »).

– Les associations de niveau 1 concernent des contraintes physiques : par exemple, l'alternateur A_1 peut être associé, d'une part, au climatiseur C_1 , à l'exclusion des autres climatiseurs et, d'autre part, aux moteurs M_1 et M_2 , à l'exclusion des autres moteurs ; C_1A_1 , M_1A_1 et M_2A_1 sont donc autorisés au niveau 1.

– Les associations de niveau de niveaux 2 et 3 concernent la prise en compte de contraintes physiques et commerciales :

- Au niveau 2, aucune restriction additionnelle n'est introduite, en particulier, toutes les combinaisons impliquant A_1 ($C_1A_1I_1$, $M_1R_1A_1$, $M_2R_1A_1$, $M_1R_2A_1$ et $M_2R_2A_1$) sont possibles.
- Au niveau 3, l'analyse de la première colonne ($C_1A_1I_1$) montre que ce triplet peut être associé à M_1R_1 et M_2R_1 , mais pas à M_1R_2 et M_2R_2 , alors qu'au niveau 2 ; $M_1R_2A_1$ et $M_2R_2A_1$ étaient possibles. On peut observer que l'interdiction de $M_3R_1C_1A_1I_1$, $M_3R_2C_1A_1I_1$ et de $M_4R_2C_1A_1I_1$ sont respectivement des héritages des interdictions du niveau 2 : $M_3R_1A_1$, $M_3R_2A_1$ et $M_4R_2A_1$. Enfin, l'interdiction de $M_4R_1C_1A_1I_1$ est un héritage de l'interdiction M_4R_1 du niveau 1.

En définitive, le nombre de produits finis passe de 216 à 10, que l'on peut décrire par les nomenclatures suivantes :

$$M_1R_1C_1A_1I_1, M_2R_1C_1A_1I_1, M_3R_1C_1A_2I_1, M_2R_1C_2A_1I_1, M_2R_2C_2A_2I_2, \\ M_3R_1C_2A_2I_2, M_3R_2C_2A_3I_2, M_3R_1C_3A_3I_3, M_3R_2C_3A_3I_3, M_4R_2C_3A_3I_3.$$

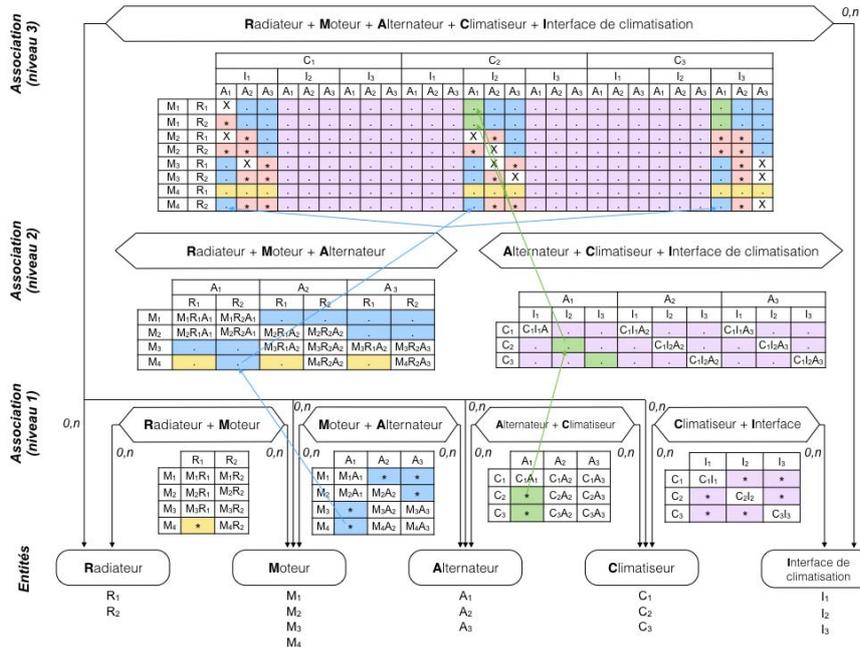


Figure 4. Illustration de la propagation des contraintes de combinaison utilisant le modèle des bases de données relationnelle

Cette figure 4 illustre la nécessité d'utiliser la cinquième forme normale des bases de données relationnelles pour décrire les nomenclatures existantes. Elle montre également la difficulté d'assurer la prise en compte des contraintes d'intégrité de la base de données, correspondant à ces restrictions entre CA dans l'association décrivant la nomenclature d'un produit fini. Cela nous amènera à nous pencher sur la description de ces contraintes. Au vu de ces limites, cette approche est à réserver aux entreprises dont la diversité produite est faible.

Ces contraintes à la libre combinaison des CA nécessitent alors l'emploi de prédicats définissant les compatibilités entre composants (Romanos, 1989). Un prédicat est une expression logique combinant un ensemble de propositions susceptibles d'être vraies ou fausses, à l'aide des opérateurs OU (noté \vee) et ET (noté \wedge), et dont le résultat final est vrai ou faux. Cette logique prédicative permet de condenser les contraintes liant l'utilisation d'un CA (proposition « vraie ») à la présence, dans le véhicule, de CA appartenant à d'autres ECA. Définissons CA_i^{-1} comme étant le prédicat prenant la valeur « vraie » si le composant CA_i peut être monté sur un véhicule, et dont la présence est conditionnée par celle d'autres composants alternatifs CA_j , choisi parmi plusieurs ensembles possibles. Par ailleurs, on posera $CA_j = \text{vrai}$ si le composant CA_j est monté sur le véhicule. On peut alors écrire les trois prédicats suivants correspondant aux trois alternateurs parmi les quinze prédicats possibles (un par CA) de l'exemple introduit à la figure 4.

$$A_1^{-1} = M_1 \wedge R_1 \wedge ((C_1 \wedge I_1) \vee (C_2 \wedge I_2))$$

$$A_2^{-1} = (M_3 \wedge R_1 \wedge ((C_1 \wedge I_1) \vee (C_2 \wedge I_2))) \vee (M_2 \wedge R_2 \wedge C_2 \wedge I_2)$$

$$A_3^{-1} = (M_3 \wedge R_1 \wedge ((C_1 \wedge I_1) \vee (C_2 \wedge I_2))) \vee (M_2 \wedge R_2 \wedge C_2 \wedge I_2)$$

Lorsque la variété résulte de la combinaison de plusieurs dizaines d'ECA, conduisant à une variété possible de plusieurs centaines de milliers de produits, cette approche pose non seulement le problème de l'explicitation des nomenclatures décrivant cette diversité mais aussi celui de son usage dans l'expression de la demande d'un client. Il est, en effet, difficilement imaginable de demander au client de spécifier sa demande en choisissant une combinaison de CA représentatifs de tous les ECA. La description d'un produit sur la base d'une description organique est d'autant plus difficile à réaliser que certains CA sont méconnus de la plupart des clients. Cela a conduit les chercheurs à améliorer le concept de nomenclature modulaire en paramétrant la nomenclature organique par une vision fonctionnelle.

3.2 Nomenclature générique

L'absence d'une libre combinaison des CA des ECA pose un problème redoutable dans l'explicitation des produits qu'il est possible de fabriquer et de vendre. Une solution à ce problème a été apportée par les nomenclatures génériques. Introduites par Hegges et Wortmann (1991), elles se différencient des nomenclatures modulaires par la définition des CA des ECA en fonction de paramètres. Les

prédicats ne sont donc plus exprimés à partir des combinaisons logiques de CA mais par des combinaisons logiques de valeurs de paramètres. La nomenclature générique telle que l'appliquent Erens et Hegge (1994) à un cas pratique, garde donc une structure modulaire mais définit en plus des paramètres dont les valeurs caractérisent de façon non ambiguë les CA des ECA. Cette approche a donné lieu à beaucoup de variantes utiles pour différents métiers (Conception, Comptabilité, Commerce, Logistique, etc.) en fonction du sens donné aux paramètres. La variante qui nous intéresse dans cet article décrit les paramètres comme des *prestations* compréhensibles pour le client (van Veen et Wortmann, 1992 ; Bertrand *et al.*, 2000). Les intérêts d'une telle description de produit sont clairs :

- elle permet au client de faire son choix au travers de prestations qu'il connaît et voit (van Veen et Wortmann, 1992), cette description a permis le développement des configurateurs web tel que nous les connaissons aujourd'hui ;
- elle permet au client d'exprimer son choix de façon plus condensée que par la liste des références (moins de paramètres que d'ECA) (Hegge, 1992) ;
- elle permet une meilleure stabilité de la définition de l'offre commerciale, car elle la désynchronise de la variabilité des composants (Olsen et Saetre, 1997).
- On peut ajouter qu'elle évite la récursivité dans la définition des prédicats basés sur les CA. En effet, dans l'exemple de prédicats donnés au §3.1 les A_i dépendent des C_j mais l'inverse est vrai aussi, ce qui génère une boucle causale.

La figure 5 illustre une telle nomenclature en reprenant l'exemple de la chaise de bureau de la figure 2.

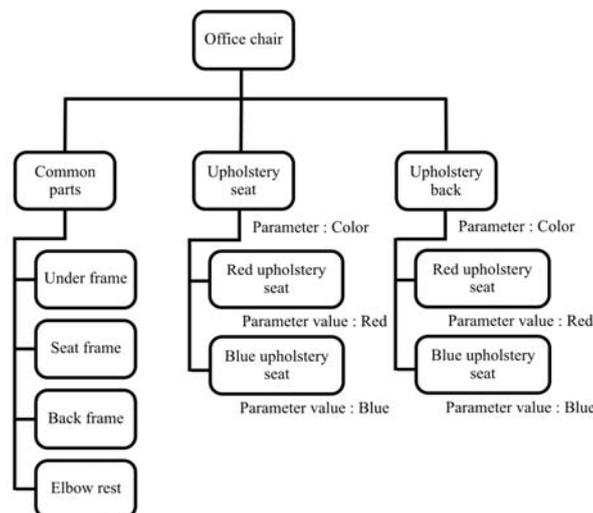


Figure 5. Exemple de nomenclature générique (adapté à partir de Hegge et Wortmann, 1991)

Les nomenclatures génériques sont donc vues comme des nomenclatures arborescentes de composants génériques que van Erens et Wortmann (1996) appellent des *familles de composants* ou que Bertrand *et al.* (2000) appellent *pseudo-items*. Chaque composant générique est composé d'un composant systématique et de composants génériques. L'arborescence de composants génériques s'arrêtant à un composant *feuille*, qui est acheté. Le niveau $n+1$ est caractérisé à la fois par toutes les valeurs des paramètres hérités du niveau n et d'un certain nombre de paramètres supplémentaires. Le choix d'un composant peut donc être déterminé, in fine, par les valeurs prises par plusieurs paramètres. .

En 1996, Erens et Wortmann proposent une théorie basée sur la structuration des informations dans une entreprise en dissociant trois types de descriptions d'une famille de produits : la vue fonctionnelle, la vue technologique et la vue physique. Les trois vues sont structurées de façon arborescente et peuvent être utilisées indépendamment les unes des autres, en fonction du besoin. Cette décomposition est intéressante car elle permet de dissocier les trois descriptions de produits souvent faites et utilisées par des équipes différentes, notamment en phase de développement. Cette démarche utilise le concept de nomenclature générique et de paramètres mais les auteurs exploitent la vision fonctionnelle dans une démarche de conception et non de configuration commerciale.

Olsen et Saetre (1997) complètent cette approche en introduisant une description des contraintes entre paramètres liant des CA différents. Ces contraintes exprimées sous forme logique (de type « si ... alors »...) ne sont pas portées par la nomenclature générique mais l'accompagnent dans le système d'information. Les auteurs, sans expliquer comment, disent alors que les applications commerciales (configurateur web, outil de passage de commande, outil de prévisions, etc.) doivent assurer, en temps réel lors de la configuration, le respect de ces contraintes. Ils sont les premiers à parler explicitement de produit virtuel qu'ils définissent comme la concaténation des choix de valeur de chacun des paramètres utilisés dans la définition de la nomenclature générique du produit. Sans en exploiter complètement toutes les possibilités, ces auteurs proposent implicitement une quatrième vision – une vue commerciale du produit – à la structure proposée par Erens et Wortmann (1996).

3.3 Conclusion de la revue de littérature

L'analyse de la littérature montre l'intérêt de l'usage de la nomenclature générique à la fois pour décrire la nomenclature d'une famille de produits et pour pointer sur un produit particulier. Mais même cette solution ne permet pas de répondre exactement au besoin des constructeurs automobiles. En effet, il est très difficile de décrire un véhicule précis sur la base d'une structure arborescente de la nomenclature organique comme le propose les nomenclatures génériques. De plus, le nombre important de prestations et de contraintes entre elles impose aux constructeurs automobiles de développer une description fonctionnelle autonome (c'est-à-dire non basée sur la structure d'une nomenclature organique).

Ce constat nous conduit à adopter une démarche praxéologique en analysant les pratiques de différents acteurs de ce secteur industriel qui reprennent pour partie certaines des idées présentées dans ce paragraphe. Cette étude nous amène à théoriser une nouvelle description de famille de produits complexe que le retrouve dans un contexte de production de masse de produits fortement diversifiés. Cette théorie répond à la fois aux besoins de la Direction Commerciale et aux besoins opérationnels en production (section 4) mais pas complètement aux besoins tactiques de planifications (section 5).

Tableau 1. Synthèse de l'analyse de la littérature

Auteurs	Date	Type d'article	Problématique majeure	Diversité de produits	diversité d'ECAs	Nombre de niveaux de nomenclature	Type de nomenclature	Existence de contraintes	Dissociation des vues du produit
Orlicky et al.	1972	théorique	planification	importante	faible	1	modulaire	non	non
Mather	1986	théorique	planification	importante	faible	1	modulaire	non	non
Rush et Barder	1988	théorique	identification*, estimation des coûts	importante	faible	1	modulaire	non	non
Tallon	1989	théorique	planification	importante	moyenne	1	modulaire	non	non
Hegge et Wortmann	1991	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	non	non
Hegge	1992	théorique	identification*	importante	moyenne	n	générique	non	non
van Veen et Wortmann	1992	théorique	identification*	importante	moyenne	n	générique	non	non
Erens et al.	1994	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	non	non
Erens et Hegge	1994	cas d'étude	identification*	importante	moyenne	n	générique	non	non
Erens et Wortmann	1996	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	oui	oui
Stonebraker	1996	théorique	planification	importante	moyenne	n	générique (implicite)	non	non
Olsen et Saetre	1997	théorique	modélisation de familles	importante	moyenne	n	générique	oui	oui (implicite)
Bertrand et al.	2000	théorique	planification	importante	forte	n	générique	non	non

* identification d'un produit fini unique dans la famille

4. Structuration des nomenclatures d'une famille de produit en automobile

Nous avons étudié en détail les pratiques de Renault pour décrire un ensemble de véhicules appartenant à une famille (un modèle) à la fois à des fins commerciales (description clients) et de production (au niveau opérationnel et tactique). Ces pratiques semblent partagées par d'autres constructeurs. Cette étude montre que la nomenclature n'est jamais utilisée au niveau 0 (produit fini). En fait, la solution adapte le concept de prestation introduit par les nomenclatures génériques pour

proposer une description d'un véhicule uniquement par le biais de prestations. Cette solution est intégrée dans les configurateurs et dans les systèmes d'information de production utilisées pour connaître quels composants sont à assembler. En effet, l'automobile est typiquement aujourd'hui le produit que le client – et la Direction Commerciale pour les prévisions – définit à partir de prestations et non de composants (cf. l'ensemble des configurateurs internet des différentes marques). Il est donc nécessaire d'utiliser une vision fonctionnelle de la famille, à des fins commerciales et de planification. Pour Olsen et Saetre (1997), cette définition virtuelle (opposée à la définition organique en composants) de la famille permet de décrire complètement un produit fini unique. Il ne définit pas un produit physique particulier identifié par son numéro de châssis mais un produit particulier au sens donné au bien fongible en droit. C'est donc un véhicule virtuel unique parmi l'ensemble de la diversité offerte au client mais pouvant être produit en plusieurs exemplaires identiques et interchangeables du point de vue du client.

La vue fonctionnelle du produit n'est plus réduite à la définition de paramètres servant à choisir une alternative à chaque ECA d'une nomenclature. Elle permet, sans aucun appel à la nomenclature organique de la famille de produits :

- au client, de personnaliser son produit ;
- au marketing, de définir l'offre commerciale,
- à la Direction commerciale, de tarifier son offre commerciale et d'établir, en coordination avec la Direction de la production, le plan directeur de production (nous le verrons au §4) ;
- à la Direction de la Production, de donner une estimation du délai de livraison pour le client.

Historiquement, l'usage de paramètres a simplifié l'établissement de la nomenclature des pièces composant un produit fini particulier (cf. §3.2). Mais le nombre de variantes de produits finis et le nombre de contraintes entre EPAs sont toujours en croissance forte. De plus, comme nous avons pu le constater, les entreprises font face à une évolution temporelle très rapide de la diversité en composants (pour une famille de produits, plusieurs centaines de modifications de composants par mois). Ces évolutions de composants sont bien souvent invisibles du client (cf. section 2). Ces considérations ont poussé les constructeurs automobiles à aller plus loin en construisant une vision fonctionnelle autonome d'une famille de produits.

À la différence des nomenclatures génériques, en automobile, les paramètres ne sont pas définis progressivement niveau par niveau. La démarche des constructeurs automobile revient implicitement à proposer d'appliquer une nomenclature générique caractérisée par l'usage de prédicats à un seul niveau de nomenclature, celui des ECA. La définition des CA dans chaque ECA se fait donc par le choix de valeur de paramètres, que nous appellerons prestations alternatives (PA) dans des ensembles de prestations alternatives (EPA), les PA d'un EPA étant mutuellement exclusives. Les EPA décrivent, dans un langage qui ne se rapporte pas à la composition physique du produit les fonctionnalités personnalisables du produit fini

que peut retenir le client. Cette approche permet de coller au plus près aux attentes du client en termes de fonctionnalités d'usage du produit fini, sans tenir compte de l'architecture et de la définition technique réelle du produit.

À titre d'illustration, une automobile est définie au travers d'EPA tels que la *motorisation*, le *niveau d'équipement*, la *peinture*, les *jantes*, la *climatisation*, l'*assistance au stationnement*, etc. La *motorisation* est un EPA regroupant toutes les principales caractéristiques (sur une fiche technique commerciale, par exemple) du moteur, et de nombreux composants (moteur, turbo, filtres, capteurs..., alternateur...) qui lui sont assemblés. Le choix d'une motorisation par le client ne permet pas de déterminer de manière non équivoque les variantes de tous ces composants à utiliser lors de l'assemblage final. L'usage d'un grand nombre de composants alternatifs est donc conditionné par le choix de plusieurs prestations alternatives appartenant à des EPA différents. Au final, un véhicule commandé par un client est complètement défini par le choix d'une PA dans chacun des EPA proposés. On parlera alors de produit (ou véhicule) complètement défini : PCD (ou VCD). La liste des PA retenus ne correspond pas à une nomenclature, puisque les prestations ne correspondant que rarement à des composants, mais cette liste permet de déterminer sans difficulté l'ensemble des composants de niveau 1 à appeler au montage, grâce à une adaptation de la logique prédicative introduite précédemment.

La figure 6 illustre le fait que ces EPA sont liés par des contraintes techniques ou commerciales similaires à celles liant les ECA sur la Figure 3. Ces contraintes commerciales ont les mêmes raisons d'être que celles introduites pour les ECA. Les contraintes techniques liant les EPA sont héritées des contraintes techniques liant les ECA. Cet héritage s'explique par le fait que le choix d'une PA détermine celui d'un ou plusieurs CA, ce qu'illustre la figure 7. Bien évidemment, ces contraintes à la libre combinaison des EPA peuvent être décrites, elles aussi, par des prédicats comme illustré au §3.2. Malgré ces restrictions, le choix est encore vaste pour le client puisque, par exemple en France, Renault propose aux clients plusieurs millions de Twingo différentes.

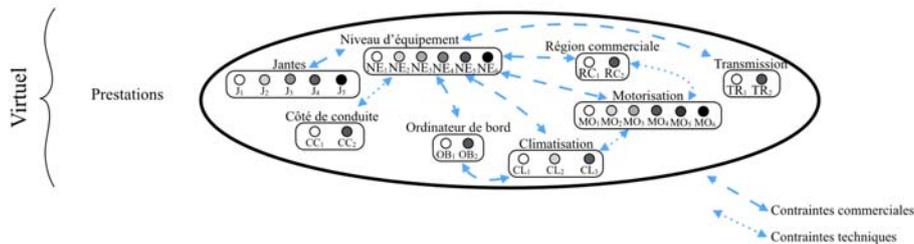


Figure 6. Représentation d'ensembles de prestations alternatives (EPA) et de leurs prestations associées

L'EPA *niveau d'équipement* définit des ensembles homogènes de niveaux de confort et de puissance du véhicule, liés à une segmentation du marché en termes d'attentes du client et de prix de vente. Non seulement il permet de spécifier certains

composants visibles par le client (qualité des plastiques, forme du siège...) mais surtout il génère des contraintes le liant à d'autres EPA car il est au cœur de la montée en gamme d'un modèle. C'est ainsi qu'une motorisation puissante ne sera disponible qu'avec le haut de gamme imposant, entre autres, des sièges en cuir, le GPS intégré et la caméra de recul. L'usage de l'EPA niveau d'équipement sorte d'EPA de synthèse permet à la fois de simplifier l'écriture des contraintes mais aussi de clarifier l'offre et la montée en gamme pour le client. Le niveau d'équipement peut être vu comme une « pseudo-prestation » si on fait un parallèle avec « le pseudo-item » de Bertrand *et al.* (2000), puisqu'il est la synthèse d'un certain nombre de prestations disparates.

Ces restrictions à la libre combinaison de PAs peuvent être illustrées par le tableau 2 établi à partir d'informations réelles prises d'un configurateur web.

Tableau 2. Exemple réel de restrictions à la combinaison des PAs, induites par les choix effectués sur le niveau d'équipement

EPA		EPA : Niveau d'Équipement							
MOtorisation	TRansmission	NE ₁	NE ₂	NE ₃	NE ₄	NE ₅	NE ₆	NE ₇	NE ₈
MO ₁	TR ₁	MO ₁ TR ₁ NE ₁	MO ₁ TR ₁ NE ₂	MO ₁ TR ₁ NE ₃	x	x	MO ₁ TR ₁ NE ₆	x	x
MO ₂	TR ₂	x	x	x	MO ₂ TR ₂ NE ₄	x	MO ₂ TR ₂ NE ₆	x	x
MO ₃	TR ₁	x	x	x	x	MO ₃ TR ₁ NE ₅	x	x	x
MO ₄	TR ₁	x	x	x	x	x	x	MO ₄ TR ₁ NE ₇	MO ₄ TR ₁ NE ₈
MO ₅	TR ₁	x	MO ₅ TR ₁ NE ₂	MO ₅ TR ₁ NE ₃	MO ₅ TR ₁ NE ₄	x	x	x	x
MO ₆	TR ₁	x	x	x	x	MO ₆ TR ₁ NE ₅	x	x	x

TR₁ : transmission manuelle ; TR₂ : transmission automatique

Avant d'examiner l'impact du choix des PA sur la détermination des CA du véhicule à produire, il est utile de noter quelques différences avec l'exemple de la figure 1 qui explicite les restrictions à la libre combinaison des CA. Le choix d'un CA est déterminé par celui d'une PA d'un EPA ou par une combinaison de PA choisies dans autant d'EPA, ce qu'illustre la figure 7. On utilisera le terme de *détermination* pour désigner la relation causale liant l'utilisation d'un CA au choix d'une PA ou de plusieurs PA. Dans cette approche des prestations, il convient de souligner que chacun des ECA existants est déterminé par les choix effectués pour au moins un EPA. Cela permet alors facilement de transformer une liste de prestations alternatives en une liste organique de composants alternatifs parfois utile au niveau opérationnel pour la production.

Ces relations de détermination, visualisées par des flèches dans la figure 7, doivent être explicitées. Lorsque le nombre d'EPA définissant le choix d'un CA est faible on peut expliciter cette détermination par des tableaux. À titre d'exemple, les trois tableaux suivants permettent de mettre en évidence les combinaisons de prestations permettant, *in fine*, un choix non équivoque (une seule croix par colonne) de l'alternateur. À la différence de l'exemple de la figure 4, le choix de l'alternateur

ne se fait pas à partir des ECA Moteur et Climatiseur mais à partir des choix de prestations Motorisation et Climatisation.

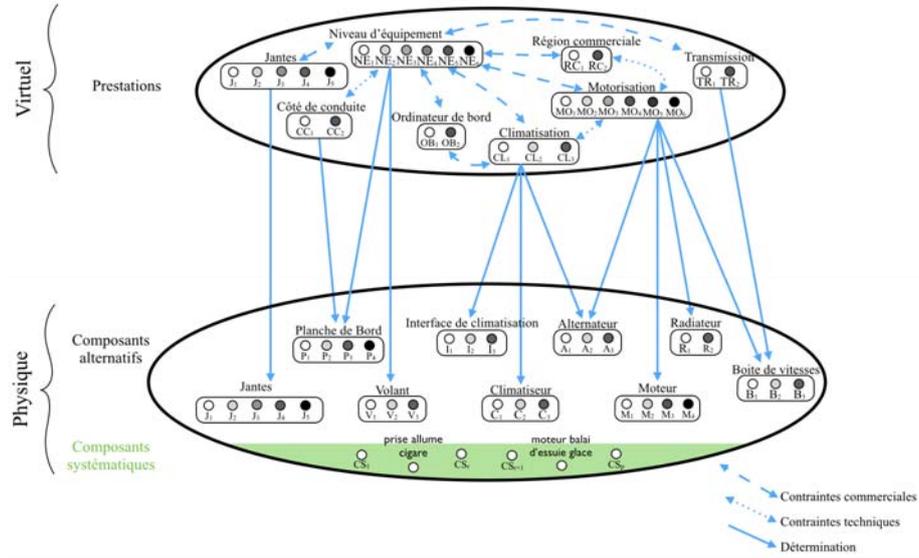


Figure 7. Représentation de la détermination des ECA par les EPA

Tableaux 3. Exemple d'une détermination de CA (alternateurs) à partir de PA (motorisation et climatisation)

		EPA Motorisation					
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆
ECA Alternateur	A ₁ ⁻¹	V	V	F	F	F	F
	A ₂ ⁻¹	F	V	V	V	V	F
	A ₃ ⁻¹	F	F	F	V	V	V

		EPA Climatisation		
		CL ₁	CL ₂	CL ₃
ECA Alternateur	A ₁ ⁻¹	V	V	F
	A ₂ ⁻¹	V	V	V
	A ₃ ⁻¹	F	V	V

CL₁ : sans climatisation ; CL₂ : climatisation manuelle ; CL₃ : climatisation automatique

F : CA interdit par la PA MO ou CL ; V : Prédicat Vrai

EPA Motorisation	MO ₁						MO ₂						MO ₃						MO ₄						MO ₅						MO ₆					
	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₁	CL ₂	CL ₃						
EPA Climatisation	MO ₁ ,CL ₁	MO ₁ ,CL ₂	MO ₁ ,CL ₃	MO ₂ ,CL ₁	MO ₂ ,CL ₂	MO ₂ ,CL ₃	MO ₃ ,CL ₁	MO ₃ ,CL ₂	MO ₃ ,CL ₃	MO ₄ ,CL ₁	MO ₄ ,CL ₂	MO ₄ ,CL ₃	MO ₅ ,CL ₁	MO ₅ ,CL ₂	MO ₅ ,CL ₃	MO ₆ ,CL ₁	MO ₆ ,CL ₂	MO ₆ ,CL ₃	MO ₁ ,CL ₁	MO ₁ ,CL ₂	MO ₁ ,CL ₃	MO ₂ ,CL ₁	MO ₂ ,CL ₂	MO ₂ ,CL ₃	MO ₃ ,CL ₁	MO ₃ ,CL ₂	MO ₃ ,CL ₃	MO ₄ ,CL ₁	MO ₄ ,CL ₂	MO ₄ ,CL ₃						
ECA Alternateur	A ₁ ⁻¹	V	V	F	V	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F						
	A ₂ ⁻¹	F	F	F	F	V	V	V	V	V	F	F	F	V	V	F	V	V	F	F	F	F	V	F	F	F	F	F	F	F						
	A ₃ ⁻¹	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	V	V	V	F	V	V						

F : Faux (héritage de prédicats antérieurs) ; F : Interdiction liée à combinaison MO_i et CL_j ; V : Prédicat Vrai

On définit maintenant CA_i^{-1} comme étant le prédicat, vrai si le composant alternatif CA_i peut être monté sur un véhicule, sa présence étant conditionnée par celle d'un ensemble de prestations alternatives PA_i choisies dans autant d'EPA. Dans ce cadre, les trois prédicats introduits précédemment pour conditionner l'existence d'un alternateur sur un véhicule, à la présence de CA, peuvent être remplacés par les prédicats suivants qui lient cette existence au choix de PA :

$$\begin{aligned}
A_1^{-1} &= (C_1 \wedge I_1 \wedge R_1 \wedge (M_1 \vee E_2)) \vee (C_1 \wedge I_2 \wedge M_2 \wedge R_1) \\
A_2^{-1} &= ((C_1 \wedge I_1) \vee (C_2 \wedge I_2)) \wedge M_3 \wedge R_1 \vee (C_2 \wedge I_2 \wedge M_2 \wedge R_2) \\
A_3^{-1} &= (((C_2 \wedge I_2) \vee (C_3 \wedge I_3)) \wedge M_3 \wedge R_2) \vee (C_3 \wedge I_3 \wedge ((M_3 \wedge R_1) \vee (M_4 \wedge R_2)))
\end{aligned}$$

Pour un véhicule, l'alternateur à utiliser sur la ligne d'assemblage correspond à l'alternateur i tel que $A_i^{-1} = \text{vrai}$ dans l'ECA considéré. La généralisation de ce principe conduit à évaluer autant de prédicats qu'il existe de CA dans l'ECA, un seul pouvant être vrai, puisque les CA d'un ECA sont nécessairement exclusifs. Cette exploration ne pose guère de problème d'un point de vue pratique. Les prédicats introduits au §3.1 décrivent des combinaisons autorisées de CA mais, contrairement à ceux présentés ici, ils ne permettent pas de définir le CA à monter sur le poste d'assemblage sans faire appel à la nomenclature exacte du véhicule, ce qui, en pratique, rend inutile l'appel aux prédicats. Rappelons que l'alternateur est un CA généralement méconnu du client alors que les choix des prestations de motorisation et de climatisation, qui ont un sens concret pour lui, permettent de déterminer l'alternateur à utiliser dans le véhicule qu'il configure, sans intervention directe de sa part. Cette possibilité constitue l'un des avantages importants de cette approche de la définition du produit par ses prestations.

Les implications opérationnelles de cette description du produit par des prestations sont multiples ; les deux premières apportent des éléments de réponse aux questions posées en introduction de cette section 2.

– Le configurateur, fondé sur le concept de prestation, permet de guider le choix d'un client potentiel à travers les EPA offerts. Dans ce cadre, les choix restant à faire sont conditionnés par ceux déjà effectués et tiennent compte des contraintes liant les EPA, afin de garantir la fabricabilité du véhicule voulu par le client. Dans cette perspective, l'appel aux nomenclatures classiques est inutile, à la fois par le configurateur mais aussi pour satisfaire les besoins de la Direction Commerciale.

– La description d'un véhicule par l'ensemble des prestations qu'il fournit permet facilement, par l'intermédiaire des prédicats, de déterminer les CA qui le composent. Cela permet d'éviter l'appel récursif – et donc sans solution – des CA comme c'était le cas au §3.1. Les besoins opérationnels du court terme sont donc correctement couverts par cette solution et, dans cette perspective, il est également inutile d'explicitier l'ensemble des nomenclatures de tous les produits qu'il est possible de produire.

– L'explicitation des contraintes de combinaisons par des prédicats exprimés non plus avec des composants mais avec des EPA simplifie leur écriture et leur mise à jour.

Cette approche de description du produit fini par des EPA et des prédicats répond donc parfaitement aux besoins opérationnels. Elle est très difficile à contourner dans la préparation de décisions tactiques car la planification de la production, au-delà de l'horizon gelé, ne peut que reposer sur des prévisions commerciales portant sur des EPA. Les difficultés viennent du fait que le PDP

s'exprime nécessairement selon la composition organique des produits en termes d'ECA. Ce décalage est à l'origine de problèmes méthodologiques importants que nous allons examiner maintenant.

5. Planification de la production en production de masse fortement diversifiée

La construction des PDP des usines d'assemblage final s'appuie sur la nomenclature des produits. Tant que l'on reste dans le périmètre de l'horizon gelé, les besoins en composants de niveau 1 se déterminent sans problème à partir des nomenclatures des véhicules commandés. On peut noter que beaucoup d'industriels bornent arbitrairement cet horizon gelé, sans le moduler en fonction de l'importance des carnets de commandes qui peuvent varier fortement d'une famille de produits à une autre. Au-delà de l'horizon gelé, la construction du PDP des usines d'assemblage final est plus compliquée. Il en est de même pour la construction des PDP des usines de la chaîne logistique situées en amont, lorsque leurs demandes, qui résultent de la combinaison des mécanismes d'explosion des nomenclatures et d'absorption des délais, sont tirées par une partie des PDP des usines d'assemblage se trouvant au-delà de l'horizon gelé.

La cohérence des décisions de production prises dans la partie de la chaîne logistique située en amont des lignes d'assemblage final dépend donc fortement de la fiabilité des PDP de ces lignes au-delà de l'horizon gelé et de la stabilité de ces informations dans le cadre de la planification glissante. Habituellement, lorsque la diversité de produits finis est relativement faible, les PDP s'établissent au niveau des produits finis (niveau 0 des nomenclatures). Lorsqu'elle devient trop importante il semble plus facile de les établir sur les composants de niveau 1, beaucoup moins nombreux. Dans les deux cas, les contraintes à la libre combinaison des PA, qui se répercutent sur celle des CA, compliquent singulièrement la définition de ces PDP (§ 5.1). Si ces PDP portent sur les CA du niveau 1, il suffit de traiter séparément chaque CA en se limitant aux seules contraintes qui le concerne (§ 5.2). Si les PDP portent sur les produits finis, on est obligé de prendre en compte l'ensemble de ces contraintes en les transcrivant au niveau des CA (§ 5.3).

5.1 Positionnement du problème de construction des PDP en production de masse fortement diversifiée

En production de masse fortement diversifiée, l'établissement des PDP d'une ligne d'assemblage repose d'abord sur une connaissance préalable du volume total de production, pour chacune des périodes de l'horizon de planification. Ce type de lignes étant caractérisé par un temps de cycle fixe, cette production résulte du temps de fonctionnement de la ligne, lequel peut dépendre du nombre d'équipes se succédant au cours de chaque période à venir. Pour des raisons de gestion du personnel mais aussi des approvisionnements, ces informations sont nécessairement anticipées sur l'horizon de planification ; on peut donc les supposer connues.

La variété de la production rend difficile la détermination des PDP au niveau des produits finis car il faut alors effectuer des prévisions au niveau de toutes les combinaisons autorisées des CA à l'origine de cette diversité. Cette difficulté peut être atténuée car il n'est pas nécessaire de travailler au niveau de détail le plus fin dans la perspective du pilotage des approvisionnements qui est au cœur de la planification. En effet, la variété induite par certains ECA, comme celui des *stickers*, peut sans problème être ignorée dans le processus de planification à condition que ces CA soient relativement de faibles valeurs et faciles à approvisionner. La variété résiduelle de produits finis reste cependant très forte dans l'industrie automobile, mais cela n'empêche pas certaines entreprises de ce secteur d'utiliser un mécanisme de création du PDP à ce niveau de détail, comme on l'examinera au § 5.2. Les difficultés posées dans la construction d'un tel mécanisme, incluent aussi celles rencontrées dans l'établissement du PDP sur les composants de niveau 1, lorsqu'ils sont déterminés par plusieurs PA.

L'établissement des PDP des composants de niveau 1 systématiquement montés sur un véhicule est immédiat car ils dépendent d'informations certaines : coefficients de nomenclature et production totale des périodes à venir. Pour les autres composants de niveau 1, c'est-à-dire les CA, la nomenclature de planification introduite au § 3.1 et le volume de production sont à la base de la détermination du PDP au-delà de l'horizon gelé. Cette nomenclature de planification doit être définie pour chaque ECA et pour chaque période de l'horizon de planification au-delà de l'horizon gelé : à chaque CA d'un ECA est associé un coefficient de nomenclature correspondant à la part, en termes de pourcentage d'utilisation, que représente ce CA dans cet ECA dans la période considérée. Si on fait l'hypothèse que ces coefficients de nomenclature sont correctement déterminés – hypothèse forte sur laquelle on reviendra dans le paragraphe suivant – deux approches de calcul du PDP au-delà de l'horizon gelé peuvent être envisagées :

- La première solution a été proposée lors de l'introduction des nomenclatures de planification dans la MRP. Les réquisitions d'une période située au-delà de l'horizon gelé sont alors calculées comme le produit du volume total de production de la période, par les coefficients de nomenclature des CA. Ce calcul repose implicitement sur l'hypothèse d'une production en *univers certain* ; dans le cadre de la planification glissante, les demandes calculées au-delà de l'horizon gelé ne sont pas modifiables. Cette hypothèse est fort peu réaliste. Pour contrer les perturbations en cascade que ces modifications de PDPs génèrent dans la chaîne logistique en amont des lignes d'assemblage, il faut nécessairement faire appel à des stocks de sécurité pour ces CA. Leur détermination manque souvent de rigueur, défaut que ne possède pas la seconde solution.

- Cette seconde solution s'appuie sur une *conception probabiliste* de la demande des CA au-delà de l'horizon gelé. Les coefficients d'une nomenclature de planification d'un ECA sont alors traités comme le vecteur de probabilité d'une distribution Multinomiale, dans laquelle le nombre d'épreuves correspond au nombre total de véhicules produits au cours de cette période (Camisulis et Giard, 2010 ; Giard et Sali 2012 ; Sali et Giard 2014). La demande d'un CA pour une période au-delà de l'horizon gelé peut alors être traitée comme une variable aléatoire

suivant une loi binomiale et le calcul du stock de sécurité peut se faire par la détermination d'un niveau de reconstituer associé à un risque de rupture de stock prédéterminé. Dans ce contexte, on montre que les besoins bruts d'un composant de niveau supérieur à 1, tirés par des demandes aléatoires des PDP situées au-delà de l'horizon gelé, sont des variables aléatoires définies comme des sommes pondérées de ces demandes aléatoires (Giard et Sali 2012 ; Sali et Giard 2014).

La pertinence de ces deux approches repose sur la qualité des prévisions faites sur les coefficients de nomenclature. Lorsque le nombre d'ECA est faible et qu'aucune contrainte ne pèse sur la libre combinaison des CA (comme c'était le cas dans la production d'ordinateurs de bureau), on peut établir facilement les prévisions des coefficients de nomenclature à partir de leurs historiques. Les techniques de lissage exponentiel sont appropriées lorsque ces évolutions structurelles sont lentes et les délais d'obtention relativement courts ; ces prévisions doivent être corrigées pour tenir compte de perturbations prévisibles sur l'évolution du marché liées à l'arrivée de nouveaux modèles et à l'impact d'actions commerciales lancées par l'entreprise ou par la concurrence. S'il existe des contraintes entre CA, l'utilisation de ces approches ne peut être envisagée que s'il est raisonnable de postuler une stabilité des caractéristiques structurelles de la demande.

Le problème est beaucoup plus compliqué dans le contexte d'une production de masse fortement diversifiée, en raison de la diversité des produits et de d'importantes restrictions pesant sur la libre combinaison des CA. On a vu en section 4 que, pour des raisons de structuration de l'offre commerciale et d'incapacité du client à définir sa demande à partir de CA, il était préférable de remplacer la nomenclature classique, listant les CA d'un véhicule donné, par une liste de PA. L'équivalence opérationnelle de ces deux descriptions est assurée par la détermination de chaque CA par un prédicat combinant un sous-ensemble de PA permettant de définir le produit. Cette solution répond parfaitement aux besoins opérationnels de la production. Se pose alors la question de l'utilisation des PA pour définir le PDP des CA, au-delà de l'horizon gelé.

On peut transposer sans problème aux EPA le principe des nomenclatures de planification utilisé pour les ECA et reprendre ainsi les méthodes de prévision évoquées ci-dessus pour les ECA. C'est du reste plus facile puisque les EPA, moins nombreux (quelques dizaines versus quelques centaines) que les ECA, ont été définis pour répondre à des préoccupations commerciales, alors que les ECA correspondent à une vision technique. Il convient alors de distinguer trois cas de figure, résumés dans le tableau 4 :

- Si le délai d'approvisionnement d'un CA est inférieur à l'horizon gelé, il est inutile d'établir le PDP au-delà de cet horizon gelé. De la même façon, l'établissement du PDP des composants systématiques est immédiat puisqu'il est fonction d'informations certaines : volume de production et coefficient de nomenclature.

- Si le délai d'approvisionnement d'un CA est supérieur à l'horizon gelé, le calcul du PDP au-delà de l'horizon gelé est nécessaire. Deux situations doivent être alors distinguées :

- Le CA est déterminé par un EPA unique. Si tel est le cas, sa prévision est immédiatement déduite de celle des PA de cet EPA.
- Le CA est déterminé par plusieurs EPA. Dans ce cas, le problème de la détermination du coefficient de nomenclature du CA à utiliser se pose, même si tous les coefficients de nomenclature des PA ont fait l'objet d'une prévision. En effet l'existence la combinaison de PA appartenant à des EPA différents dans son prédicat pose un problème redoutable, comme nous allons le voir ci-après.

Tableau 4. Typologie des problèmes d'établissement du PDP d'un composant de niveau 1

		Composants systématiquement montés	Nombre d'EPAs impliqués dans la détermination des ECAs	
			1	≥ 2
Délai d'obtention	∨ Horizon Gelé	Approvisionnement ou production synchrone parfois possible mais pas forcément nécessaire	Approvisionnement ou production synchrone souhaitable autant que possible	Approvisionnement ou production synchrone souhaitable autant que possible
	∧ Horizon Gelé	Approvisionnement reposant sur les seules prévisions de volumes de production	Approvisionnement s'appuyant sur les nomenclatures de planification des prestations	Approvisionnement s'appuyant sur un pilotage complexe à définir

Illustrons les difficultés engendrées par la détermination de prévisions d'un CA déterminé par un prédicat faisant intervenir plusieurs EPA. Le tableau 5 reprend les informations du tableau 3 et permet de montrer concrètement comment chaque alternateur est déterminé par une combinaison des prestations de motorisation et de climatisation. Les trois prédicats de détermination des trois CA de l'ECA « Alternateur » ont été reportés en-dessous de ce tableau.

Tableau 5. Détermination des alternateurs à partir des prestations de motorisation et de climatisation

		EPA MOrisation					
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆
EPA CLimatisation	CL ₁	A ₁	A ₁	A ₂	-	-	-
	CL ₂	A ₁	A ₂	A ₂	A ₂	A ₂	A ₃
	CL ₃	-	-	-	A ₂	A ₃	A ₃

$$A_1^{-1} = (MO_1 \wedge (CL_1 \vee CL_2)) \vee (MO_2 \wedge CL_1)$$

$$A_2^{-1} = ((MO_2 \vee MO_3 \vee MO_4 \vee MO_5) \wedge CL_2) \vee (MO_3 \wedge CL_1) \vee (MO_4 \wedge CL_3)$$

$$A_3^{-1} = ((MO_5 \vee MO_6) \wedge CL_3) \vee (MO_2 \wedge CL_2)$$

Si on adopte les conventions usuelles en probabilité pour décrire les coefficients de nomenclature des CA et des PA, on aboutit au tableau 6 qui décrit les

composantes du calcul des coefficients des CA des alternateurs, à partir des coefficients des prestations de motorisation et de climatisation ; ces relations de calculs figurent en dessous du tableau et font intervenir les 12 valeurs non nulles de ce tableau (hors distributions marginales).

Tableau 6. Détermination des coefficients de nomenclature des alternateurs à partir de prestations motorisation et climatisation

		EPA MOrisation						
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO _{Ensemble}
EPA	CL ₁	P(MO ₁ ∧CL ₁)	P(MO ₂ ∧CL ₁)	P(MO ₃ ∧CL ₁)	-	-	-	P(CL ₁)
	CL ₂	P(MO ₁ ∧CL ₂)	P(MO ₂ ∧CL ₂)	P(MO ₃ ∧CL ₂)	P(MO ₄ ∧CL ₂)	P(MO ₅ ∧CL ₂)	P(MO ₆ ∧CL ₂)	P(CL ₂)
CLimatisation	CL ₃	-	-	-	P(MO ₄ ∧CL ₃)	P(MO ₅ ∧CL ₃)	P(MO ₆ ∧CL ₃)	P(CL ₃)
	CL _{Ensemble}	P(MO ₁)	P(MO ₂)	P(MO ₃)	P(MO ₄)	P(MO ₅)	P(MO ₆)	100%

$$P(A_1) = P(MO_1 \wedge CL_1) + P(MO_2 \wedge CL_1) + P(MO_3 \wedge CL_1)$$

$$P(A_2) = P(MO_2 \wedge CL_2) + P(MO_3 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_2) + P(MO_5 \wedge CL_2) + P(MO_6 \wedge CL_2)$$

$$P(A_3) = P(MO_5 \wedge CL_3) + P(MO_6 \wedge CL_3)$$

Les 3 P(CL_i) et les 6 P(MO_j) étant réputées connues (marge du tableau 6), la détermination des coefficients de nomenclature revient donc à trouver une solution au système suivant à 9 équations et 12 inconnues.

$$P(CL_1) = P(MO_1 \wedge CL_1) + P(MO_2 \wedge CL_1) + P(MO_3 \wedge CL_1)$$

$$P(CL_2) = P(MO_2 \wedge CL_2) + P(MO_3 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_2) + P(MO_5 \wedge CL_2) + P(MO_6 \wedge CL_2)$$

$$P(CL_3) = P(MO_4 \wedge CL_3) + P(MO_5 \wedge CL_3) + P(MO_6 \wedge CL_3)$$

$$P(MO_1) = P(MO_1 \wedge CL_1) + P(MO_1 \wedge CL_2)$$

$$P(MO_2) = P(MO_2 \wedge CL_1) + P(MO_2 \wedge CL_2)$$

$$P(MO_3) = P(MO_3 \wedge CL_1) + P(MO_3 \wedge CL_2)$$

$$P(MO_4) = P(MO_4 \wedge CL_2) + P(MO_4 \wedge CL_3)$$

$$P(MO_5) = P(MO_5 \wedge CL_2) + P(MO_5 \wedge CL_3)$$

$$P(MO_6) = P(MO_6 \wedge CL_2) + P(MO_6 \wedge CL_3)$$

On est donc en présence d'un système sous-déterminé acceptant une infinité de solutions, insuffisant donc pour déterminer les coefficients de nomenclature des alternateurs. Cette sous-détermination est systématique lorsqu'un ECA est déterminé par deux EPA ou plus, sauf dans le cas peu probable où les prédicats de détermination de chaque CA d'un ECA ne font intervenir qu'une seule prestation par EPA impliqué dans cette détermination. Pour obtenir une solution permettant d'établir le PDP des alternateurs au-delà de l'horizon gelé, il faut introduire 3 contraintes supplémentaires ou ajouter un mécanisme d'optimisation, pour lever cette sous-détermination ; la seconde possibilité sera illustrée aux tableaux 7. Ces deux mécanismes introduisent une part d'arbitraire dans la détermination de la solution.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, dans le cas d'une production de masse fortement diversifiée, le PDP peut être établi au niveau des composants de niveau 1 (§ 5.2) ou des produits finis (§ 5.3). On a distingué deux usages possibles des coefficients des nomenclatures de planification pour définir le PDP : une approche déterministe et une approche stochastique. Dans la méthode

d'établissement du PDP au niveau des références de niveau 1, on s'appuiera sur une vision probabiliste des réquisitions du PDP au-delà de l'horizon gelé. L'établissement de PDP au niveau des références de produits finis, solution retenue par certains constructeurs automobiles, repose sur une approche déterministe.

5.2 Détermination du PDP au niveau 1 de la nomenclature

Le tableau 4 permet de restreindre le problème de la définition du PDP des composants de niveau 1 en écartant les composants systématiques et ceux dont le délai d'obtention ne dépasse pas l'horizon gelé. Le problème se pose donc pour les CA ne rentrant pas dans ces catégories. Dans ce paragraphe, on suppose que ces CA sont déterminés par un ou plusieurs EPA.

Lorsque l'on dispose de prévisions sur les coefficients de nomenclatures d'un ECA, il est possible d'utiliser l'approche probabiliste de la définition du PDP au-delà de l'horizon gelé (cf. § 5.1). Pour appliquer cette solution, il faut disposer de valeurs prévisionnelles des coefficients de nomenclature des CA. Trois cas de figure peuvent être distingués :

- Cas 1. Les coefficients de nomenclature d'un ECA sont calculés à partir de ceux des EPA qui le déterminent.
- Cas 2. Les coefficients de nomenclature d'un ECA peuvent être calculés sans passer par les EPA, en partant directement de leurs historiques. Dans ce cas, il est inutile d'effectuer des prévisions pour les EPA qui déterminent uniquement ces ECA.
- Cas 3. L'approvisionnement des CA d'un ECA peut ne pas être piloté par la MRP mais par un système ne reposant pas sur des prévisions, par exemple, sur une politique de type « point de commande – quantité de commande ». Cette solution est utilisée pour gérer les composants dont la gestion est exclue du PDP, comme indiqué au début du § 5.1.

Cas 1 - coefficients de nomenclature d'un ECA calculés à partir de ceux d'EPA

Le premier cas implique la connaissance des nomenclatures des EPA qui déterminent ceux des ECA auxquels on s'intéresse, par l'intermédiaire des prédicats. On dispose donc des valeurs prévisionnelles des coefficients de nomenclature des EPA nécessaires à la prévision des coefficients des ECA pris en compte dans le PDP. Il convient alors de distinguer deux possibilités :

- Le CA est déterminé par un EPA unique. Le coefficient de nomenclature de ce CA est immédiatement donné par ceux de cet EPA qui le détermine. Il est alors possible d'utiliser l'approche probabiliste, utilisant un risque de rupture de stock arbitrairement faible, pour déterminer les lancements en production de composants, devant couvrir des besoins partiellement ou totalement aléatoires. Cette approche a fait l'objet d'une dizaine de benchmarks sur des cas réels pour une entreprise automobile (Giard et Sali 2012, Sali et Giard 2014), en comparant les résultats avec

ceux tirés d'une exploitation de la solution d'établissement du PDP au niveau du produit fini décrite en § 5.3. La supériorité de l'approche aléatoire est nette.

– Le CA est déterminé par plusieurs EPA, le problème de la prévision du coefficient de nomenclature du CA est nettement plus compliqué comme on l'a montré à la fin du § 5.1. On peut chercher à résoudre le problème de sous-détermination mis en évidence à la fin du § 5.1, en passant par une fonction à optimiser. En reprenant l'exemple des tableaux 5 et 6, on peut imaginer chercher des valeurs prévisionnelles des $P_1(CL_i \wedge MO_j)$ qui minimisent un indicateur d'écart entre ces prévisions et les dernières valeurs $P_0(CL_i \wedge MO_j)$ historiquement observées. Cette méthode est illustrée par les tableaux 7 qui s'appuient sur l'exemple des tableaux 5 et 6, et utilise le critère $\text{Min} \sum_j [P_1(CL_i \wedge MO_j) - P_0(CL_i \wedge MO_j)]^2$ pour lever la sous-détermination. Le

tableau de gauche correspond au tableau « historique » des coefficients de croisement des PA. Celui de droite fournit les prévisions effectuées sur les structures des prestations de motorisation et de climatisation (distributions marginales) et la solution qui minimise le critère retenu, sous contrainte de respect des marges (cf. les 9 équations données précédemment). On peut souligner que cette méthode est utilisée ici localement (pour un CA unique) et donc de manière différente de celle qui sera décrite au § 5.3. En effet, elle ne met en jeu, pour la définition des coefficients d'un ECA que les seuls EPA qui la détermine, sans chercher à définir les coefficients de l'ensemble des ECA dans le même calcul. Un EPA peut donc être mobilisé autant de fois que nécessaire. Cette approche n'a pas été exploitée à notre connaissance.

Tableaux 7. Exemple numérique de détermination des coefficients de nomenclature des alternateurs à partir de ceux des prestations motorisation et climatisation avec critère de minimisation

		Coefficients initiaux $P_0(CL_i \wedge MO_j)$							Coefficients prévisionnels $P_1(CL_i \wedge MO_j)$								
		EPA MOtorisation							EPA MOtorisation								
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO _{Ensemble}	MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO _{Ensemble}		
EPA	CLimatisation	CL ₁	0,02	0,08	0,11				0,21	0,02667	0,06667	0,10667				0,20000	Structure CLimatisation prévue
		CL ₂	0,07	0,12	0,06	0,05	0,11	0,08	0,49	0,07333	0,10333	0,05333	0,04333	0,09334	0,08333	0,45000	
		CL ₃				0,11	0,10	0,09	0,30				0,12667	0,10666	0,11667	0,35000	
	CL _{Ensemble}	0,09	0,20	0,17	0,16	0,21	0,17	1,00	0,10000	0,17000	0,16000	0,17000	0,20000	0,20000	1,00000		
		Structure MOtorisation prévue															
		$P(A_1)=0,17$	$P(A_2)=0,56$	$P(A_3)=0,26$								$P(A_1)=0,16667$	$P(A_2)=0,52667$	$P(A_3)=0,30667$			

Cas 2 - calcul des coefficients de nomenclature d'un ECA à partir de son historique

On s'intéresse avant tout ici au cas d'un CA déterminé par plusieurs EPA, le cas d'un CA déterminé par un seul EPA ayant été traité implicitement dans le cas 1. La solution retenue consiste à effectuer directement des prévisions du coefficient de ce CA. Plutôt que de reprendre les dernières valeurs observées des coefficients des EPA concernés, il est possible d'utiliser une technique de lissage exponentiel simple

fournissant directement les prévisions $\hat{P}_{t+1}(CA_i) = \alpha \cdot P_t(CA_i) + (1 - \alpha) \cdot \hat{P}_{t-1}(CA_i)$ des coefficients de l'ECA, pour les périodes postérieures à t . Dans ces calculs, la contrainte $\sum_i \hat{P}_{t>t}(CA_i) = 1$ doit être respectée. Ceci est garanti à l'initialisation du processus de calcul du lissage exponentiel qui utilise des coefficients dont la somme est nécessairement égale à 1 ; ensuite, cette propriété est nécessairement conservée parce que les prévisions des coefficients d'une même famille de produits utilisent toutes le même coefficient de lissage. L'usage de cette technique de lissage exponentiel suppose que l'évolution de la structure soit lente et que les délais d'approvisionnement soient relativement courts, sinon la direction commerciale devrait effectuer une prévision explicite. Deux remarques complémentaires peuvent être formulées. La valeur du coefficient de lissage α utilisé dans les prévisions des coefficients d'un EPA peut être périodiquement ajustée, par exemple sur la base d'un critère de minimisation de la somme des carrés des erreurs de prévision. De plus, l'utilisation d'un filtre linéaire génère toujours des oscillations connues sous le nom d'effet Slutsky-Yule, lesquelles induisent un biais dans la prévision (Kendall, 1976). On peut facilement contrer ce biais en majorant la prévision par une quantité liée à l'écart type des erreurs de prévision, ce qui contre le risque de sous-évaluation si la prévision se trouve sur la partie haute d'une oscillation (ce qui ne peut être connu qu'avec du recul), au prix de la constitution d'un stock de sécurité excessif dans le cas contraire.

Cette approche a fait l'objet d'un benchmark en temps réel pendant trois mois dans une usine d'assemblage sur l'approvisionnement de faisceaux électriques dont l'ECA mobilise plusieurs EPA ; cette comparaison avec le système en place, s'inspirant de la démarche décrite au paragraphe suivant, a montré une supériorité nette de l'approche probabiliste basée sur des prévisions directes des 17 faisceaux susceptibles d'être montés (Camisullis 2008, Camisullis et al., 2010).

5.3 Détermination du PDP au niveau 0 de la nomenclature

La solution itérative préconisée par certains constructeurs automobiles consiste à traiter progressivement les prévisions commerciales exprimées à la maille des EPA pour aboutir à des prévisions au niveau des produits finis (niveau 0 de la nomenclature). Chaque produit fini est décrit par une liste de PA couvrant tous les EPA. Les prédicats sont alors utilisés pour traduire cette description fonctionnelle en une description physique permettant de connaître les CA consommés pour la fabrication de ce véhicule. Les informations commerciales exprimées au niveau des EPA consistent en des coefficients de prévision pour chaque PA. Le passage d'une prévision au niveau des EPA à une prévision au niveau des produits finis consiste à combiner de manière itérative les PA des EPA pour progressivement enrichir la définition d'un objet qui, en fin de parcours, devient un produit fini. La combinaison des PA d'EPA donne lieu à des résolutions successives de systèmes d'équations permettant de calculer des coefficients de prévision qui sont, la plupart du temps, sous-déterminés comme illustré au § 5.1. Le résultat final de ce processus itératif est qualifié d'enrichissement de la demande commerciale par l'un des constructeurs qui

exploite cette démarche dont le résultat final est une prévision exprimée en véhicules complètement définis (VCD). En respectant les contraintes techniques et commerciales datées, un VCD est une des combinaisons possibles de PA représentatives de la totalité des EPA. Un VCD n'a pas d'existence physique, mais il est le reflet de ce que pourrait être un produit fini réel fabriqué à une date donnée ; il peut être alors qualifié de produit virtuel. Par construction, un VCD respecte l'ensemble des contraintes techniques et commerciales. Cette propriété confère au VCD la même cohérence que celle des produits vendables. L'explosion classique des nomenclatures est alors réalisée au niveau des produits finis en utilisant les prédicats qui identifient les CA constituant chaque VCD.

Tableaux 8. Exemple numérique de détermination des coefficients de nomenclature associés à une combinaison de trois PA appartenant respectivement aux EPA Climatisation, MOrisation et Région Commerciale

Coefficients initiaux $P_0(CL_i \wedge MO_j \wedge CR_k)$

		Meta-EPA (MOrisation, CLimatisation)												
		CL ₁	CL ₁	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₃	CL ₃						
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO ₄	MO ₅	MO ₆	
		(CL ₁ ∧MO ₁)	(CL ₁ ∧MO ₂)	(CL ₁ ∧MO ₃)	(CL ₂ ∧MO ₁)	(CL ₂ ∧MO ₂)	(CL ₂ ∧MO ₃)	(CL ₂ ∧MO ₄)	(CL ₂ ∧MO ₅)	(CL ₂ ∧MO ₆)	(CL ₃ ∧MO ₄)	(CL ₃ ∧MO ₅)	(CL ₃ ∧MO ₆)	
Région Commerciale	RC ₁	0,020	0,050	0,070	0,090	0,080	0,060	0,010	0,015	0,060	0,070	0,005	0,070	
	RC ₂	0,000	0,050	0,050	0,000	0,040	0,020	0,040	0,080	0,025	0,010	0,080	0,005	
	RC _{Ensemble}	0,020	0,100	0,120	0,090	0,120	0,080	0,050	0,095	0,085	0,080	0,085	0,075	
		Meta-EPA Ensemble [CS,MO] Ensemble												
		0,600												
		1,000												

Valeurs prévisionnelles des coefficients $P_1(CL_i \wedge MO_j \wedge CR_k)$

		Meta-EPA (MOrisation, CLimatisation)												
		CL ₁	CL ₁	CL ₁	CL ₂	CL ₃	CL ₃	CL ₃						
		MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO ₄	MO ₅	MO ₆	
		(CL ₁ ∧MO ₁)	(CL ₁ ∧MO ₂)	(CL ₁ ∧MO ₃)	(CL ₂ ∧MO ₁)	(CL ₂ ∧MO ₂)	(CL ₂ ∧MO ₃)	(CL ₂ ∧MO ₄)	(CL ₂ ∧MO ₅)	(CL ₂ ∧MO ₆)	(CL ₃ ∧MO ₄)	(CL ₃ ∧MO ₅)	(CL ₃ ∧MO ₆)	
Région Commerciale	RC ₁	0,027	0,000	0,000	0,073	0,000	0,000	0,000	0,017	0,083	0,127	0,107	0,117	
	RC ₂	0,000	0,067	0,107	0,000	0,103	0,053	0,043	0,077	0,000	0,000	0,000	0,000	
	RC _{Ensemble}	0,027	0,067	0,107	0,073	0,103	0,053	0,043	0,093	0,083	0,127	0,107	0,117	
		Meta-EPA Ensemble [CS,MO] Ensemble												
		0,550												
		0,450												
		1,000												
		Structure prévue Régions Commerciale												
		Structure prévue du Meta-EPA [CLimatisation, MOrisation] (coefficients obtenus à la dernière itération - cf. Tableau 6)												

À chaque étape du processus d'enrichissement, la résolution consiste à choisir une solution particulière parmi l'infinité de solutions possibles. Pour que ce choix puisse se faire, il est nécessaire de définir un critère de sélection comme celui proposé au § 5.2 consistant à minimiser un indicateur d'écart entre la solution recherchée, représentant les valeurs prévisionnelles des coefficients (variables de décision) portant sur des combinaisons de PA, et les dernières valeurs observées. Pour poursuivre la logique de calcul des coefficients à un niveau de combinatoire plus élevé (impliquant par exemple trois EPA), il faut constituer de nouveaux PA plus agrégés, ainsi nous définissons un ensemble pouvant être qualifié de Méta-

EPA. Les PA d'un méta-EPA résultent de la combinaison d'au moins deux PA basiques appartenant à différents EPA. Par exemple, les combinaisons $CL_i \wedge MO_j$ peuvent être vues comme des PA du méta-EPA (Motorisation, CLimatisation).

Ce processus itératif consiste donc à enrichir progressivement, et sur chaque période de l'horizon de planification, la demande commerciale exprimée au niveau des EPA. Les tableaux 8 illustrent comment on procède au calcul de coefficients associés à des combinaisons de PA issues des EPA Motorisation, Climatisation et Région Commerciale, les combinaisons $CL_i \wedge MO_j$ interdites n'étant pas reprises dans le méta-EPA combinant les EPA motorisation et climatisation. Dans cet exemple, le calcul fait dans le tableau 6 (les coefficients de prévision relatifs aux combinaisons $CL_i \wedge MO_j$) est utilisé comme une donnée d'entrée pour calculer les coefficients de prévision de la combinaison $(CL_i \wedge MO_j) \wedge RC_k$.

Le premier des tableaux 8 fournit les coefficients initiaux ou historiques associés aux combinaisons autorisées $(CL_i \wedge MO_j) \wedge RC_k$. Le second de ces tableaux propose l'une des solutions possibles au calcul des coefficients de prévision des combinaisons $(MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k$. Cette solution respecte la structure des prévisions de l'EPA Région Commerciale et la structure des prévisions du méta-EPA (MOTORISATION, CLIMATISATION) obtenue au tableau 6. Puisque le système d'équation est encore sous-déterminé à cette étape du processus d'enrichissement, les valeurs de $P_1((MO_i \wedge CL_j) \wedge RC_k)$ de ce second tableau sont obtenues grâce à un modèle d'optimisation qui minimise l'indicateur :

$$\sum_j \left[P_1((CL_i \wedge MO_j) \wedge RC_k) - P_0((CL_i \wedge MO_j) \wedge RC_k) \right]^2$$

sous les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} P_1(CL_1 \wedge MO_1 \wedge RC_1) + P_1(CL_1 \wedge MO_1 \wedge RC_2) &= 0.027 \\ P_1(CL_1 \wedge MO_2 \wedge RC_1) + P_1(CL_1 \wedge MO_2 \wedge RC_2) &= 0.067 \\ P_1(CL_1 \wedge MO_3 \wedge RC_1) + P_1(CL_1 \wedge MO_3 \wedge RC_2) &= 0.107 \\ P_1(CL_2 \wedge MO_1 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_1 \wedge RC_2) &= 0.073 \\ P_1(CL_2 \wedge MO_2 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_2 \wedge RC_2) &= 0.103 \\ P_1(CL_2 \wedge MO_3 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_3 \wedge RC_2) &= 0.053 \\ P_1(CL_2 \wedge MO_4 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_4 \wedge RC_2) &= 0.043 \\ P_1(CL_2 \wedge MO_5 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_5 \wedge RC_2) &= 0.093 \\ P_1(CL_2 \wedge MO_6 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_6 \wedge RC_2) &= 0.083 \\ P_1(CL_3 \wedge MO_4 \wedge RC_1) + P_1(CL_3 \wedge MO_4 \wedge RC_2) &= 0.127 \\ P_1(CL_3 \wedge MO_5 \wedge RC_1) + P_1(CL_3 \wedge MO_5 \wedge RC_2) &= 0.107 \\ P_1(CL_3 \wedge MO_6 \wedge RC_1) + P_1(CL_3 \wedge MO_6 \wedge RC_2) &= 0.117 \\ P_1(CL_1 \wedge MO_1 \wedge RC_1) + P_1(CL_1 \wedge MO_2 \wedge RC_1) + P_1(CL_1 \wedge MO_3 \wedge RC_1) & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +P_1(CL_2 \wedge MO_1 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_2 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_3 \wedge RC_1) \\
& +P_1(CL_2 \wedge MO_4 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_5 \wedge RC_1) + P_1(CL_2 \wedge MO_6 \wedge RC_1) \\
& +P_1(CL_3 \wedge MO_4 \wedge RC_1) + P_1(CL_3 \wedge MO_5 \wedge RC_1) + P_1(CL_3 \wedge MO_6 \wedge RC_1) = 0.550 \\
P_1(CL_1 \wedge MO_1 \wedge RC_2) & + P_1(CL_1 \wedge MO_2 \wedge RC_2) + P_1(CL_1 \wedge MO_3 \wedge RC_2) \\
& +P_1(CL_2 \wedge MO_1 \wedge RC_2) + P_1(CL_2 \wedge MO_2 \wedge RC_2) + P_1(CL_2 \wedge MO_3 \wedge RC_2) \\
& +P_1(CL_2 \wedge MO_4 \wedge RC_2) + P_1(CL_2 \wedge MO_5 \wedge RC_2) + P_1(CL_2 \wedge MO_6 \wedge RC_2) \\
& +P_1(CL_3 \wedge MO_4 \wedge RC_2) + P_1(CL_3 \wedge MO_5 \wedge RC_2) + P_1(CL_3 \wedge MO_6 \wedge RC_2) = 0.450
\end{aligned}$$

Dans la suite de cet article, nous parlerons de la « méthode d'optimisation » en faisant référence à ce modèle d'optimisation qui minimise l'indicateur d'écart entre les prévisions et les valeurs initiales.

L'existence de composants alternatifs déterminés par un grand nombre d'EPA implique de nombreuses étapes dans l'enrichissement de la demande commerciale. Le cas extrême est celui d'un CA déterminé par l'ensemble des EPA. En pratique cette méthode aboutit donc à des prévisions dont le niveau de finesse atteint celui du véhicule fini, c'est-à-dire le niveau 0 de la nomenclature, privé de ses composants systématiques et de ceux utilisés en différenciation retardée. Sans aucun autre aménagement, le processus d'enrichissement qui vient d'être décrit serait difficile à mettre en œuvre dans la réalité car à la dernière étape d'enrichissement, le nombre de variables de décision atteindrait celui de la diversité des produits finis. Pour contourner ce problème, les PA sont combinés par groupes d'EPA fortement dépendants. La notion de dépendance entre EPA renvoie à l'existence de contraintes techniques et/ou commerciales entre les PA appartenant à ces ensembles (cf. figure 6). Les méta-EPA ainsi constitués à partir d'EPA interdépendants regroupent des combinaisons de PA dont les coefficients sont calculés selon le mécanisme d'optimisation précédemment illustré. Par ces regroupements en Méta-EPA, qui par construction présentent des liens de dépendance limités, il devient possible de calculer des coefficients de nomenclature en combinant deux à deux les éléments appartenant à ces nouveaux ensembles. Les coefficients obtenus sont ensuite utilisés pour générer, sur chaque période de l'horizon de planification, des VCD caractérisés sur l'ensemble des PA et dont le nombre total est égal au volume de production périodique. Nous reviendrons par la suite sur le mécanisme qui permet de passer de coefficients de nomenclatures associés à des combinaisons de PA à une population de VCD sur chaque période de l'horizon de planification.

Pour illustrer pas à pas le fonctionnement de cette approche, prenons l'exemple d'un modèle de véhicule configurable à partir des EPA spécifiés dans la figure 7 (Région commerciale, Motorisation, Niveau d'équipement, Transmission, Côté de conduite, Jantes, Climatation, Ordinateur de bord). Pour simplifier notre propos, on fera l'hypothèse d'une offre commerciale stable sur l'horizon de planification et d'une ligne de production dédiée uniquement à l'assemblage du seul modèle étudié.

Dans l'approche décrite dans cette section, la direction commerciale exprime sa demande sous la forme de prévisions au niveau des PA de chaque EPA. Ces prévisions, supposées respecter la capacité industrielle disponible, sont exprimées

pour un modèle donné en pourcentages de la production totale par période. Le processus d'enrichissement de cette demande peut alors se décrire en quatre étapes.

– Étape 1. La première étape du processus d'enrichissement de la demande commerciale commence par la construction de plusieurs méta-EPA comme illustré ci-dessous. On peut noter que dans cette construction arbitraire, les EPA d'un même méta-EPA sont dépendants et que les méta-EPA, pris deux à deux, sont indépendants sauf lorsqu'un des deux méta-EPA est celui constitué à partir des EPA : Niveau d'équipement, Région Commerciale et Motorisation. Ce méta-EPA particulier, qualifié de principal et repéré en bleu sur la figure 8, peut constituer une première base à partir de laquelle la demande commerciale sera enrichie en combinant ses éléments avec ceux des autres méta-EPA, en jaune sur la figure 8, qualifiés, eux, de secondaires.

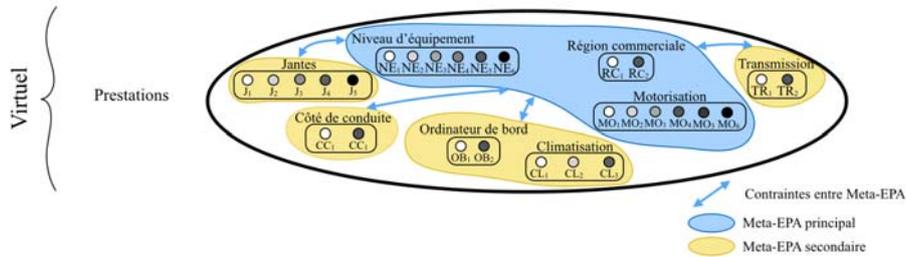


Figure 8. Représentation des méta-EPA

– Étape 2. La deuxième étape du processus d'enrichissement de la demande commerciale consiste à appliquer au sein de chaque méta-EPA le principe d'optimisation précédemment illustré pour obtenir des coefficients sur des combinaisons de PA. Il faudra donc pour chaque période de l'horizon de planification, au sein de chaque méta-EPA, appliquer ce principe autant de fois qu'il y a d'EPA moins 1, dans le méta-EPA considéré. Les résultats de cette étape pourront être considérés comme les coefficients marginaux de méta-PA issues de la combinaison de PA basiques. Les méta-EPA constitués d'un seul EPA (comme les jantes, le côté de conduite ou la transmission) ne sont pas concernés par cette étape.

– Étape 3. La troisième étape du processus consiste à trouver, selon le même principe d'optimisation présenté en début de section, les coefficients associés à la combinaison de deux PA dont une d'elles appartient au méta-EPA principal et l'autre à un des méta-EPA secondaires. Sur une période donnée il s'agira de compléter indépendamment et dans un ordre quelconque un à un les tableaux 9 ci-dessous où les coefficients marginaux sont le résultat de la deuxième étape du processus ; ces coefficients marginaux sont représentés par leur formule, en caractères rouges, dans les tableaux 9.

– Étape 4. La quatrième et dernière étape du processus consiste, à partir des coefficients calculés à la troisième étape, de construire autant de VCD que le volume de production périodique le demande. Cette étape peut être subdivisée en deux sous étapes.

Tableaux 9. Tableaux de calcul des coefficients de nomenclature associés à des combinaisons entre les PA du méta-EPA principal et les PA des méta-EPA secondaires

			PA du Meta-EPA principal [Région Commerciale ^ Niveau d'Équipement ^ M Otorisation]											
			RG ₁	RG ₂	RG ₃	RG ₄	RG ₅	RG ₆	RG ₇	RG ₈	RG ₉	RG ₁₀	RG ₁₁	RG ₁₂
			NE ₁	NE ₂	NE ₃	NE ₄	NE ₅	NE ₆	NE ₇	NE ₈	NE ₉	NE ₁₀	NE ₁₁	NE ₁₂
			MO ₁	MO ₂	MO ₃	MO ₄	MO ₅	MO ₆	MO ₇	MO ₈	MO ₉	MO ₁₀	MO ₁₁	MO ₁₂
			RG ₁ NE ₁ MO ₁	RG ₂ NE ₂ MO ₂	RG ₃ NE ₃ MO ₃	RG ₄ NE ₄ MO ₄	RG ₅ NE ₅ MO ₅	RG ₆ NE ₆ MO ₆	RG ₇ NE ₇ MO ₇	RG ₈ NE ₈ MO ₈	RG ₉ NE ₉ MO ₉	RG ₁₀ NE ₁₀ MO ₁₀	RG ₁₁ NE ₁₁ MO ₁₁	RG ₁₂ NE ₁₂ MO ₁₂
PA du Meta-EPA secondaire [Ordinateur de bord ^ Climatiseur]	OB ₁	CL ₁	OB ₁ ∧CL ₁											
	OB ₁	CL ₂	OB ₁ ∧CL ₂											
	OB ₁	CL ₃	OB ₁ ∧CL ₃											
	OB ₂	CL ₁	OB ₂ ∧CL ₁											
	OB ₂	CL ₂	OB ₂ ∧CL ₂											
	OB ₂	CL ₃	OB ₂ ∧CL ₃											
PA du Meta-EPA secondaire [Jantes]	JA ₁	P0 ₁												
	JA ₂	P0 ₂												
	JA ₃	P0 ₃												
	JA ₄	P0 ₄												
	JA ₅	P0 ₅												
PA du Meta-EPA secondaire [Côte de Conduite]	CC ₁	CC ₁												
	CC ₂	CC ₂												
PA du Meta-EPA secondaire [Transmission]	TR ₁	TR ₁												
	TR ₂	TR ₂												

- Sous-étape 4.1. Chaque produit est caractérisé par le méta-EPA principal en utilisant les coefficients marginaux obtenus à l'étape 2. Ensuite pour chaque produit, un des PA appartenant au méta-EPA principal est choisi aléatoirement en utilisant l'approche de Monte-Carlo basée sur les coefficients marginaux calculés.

- Sous-étape 4.2. Une fois qu'un produit est décrit par un PA du méta-EPA principal, il est caractérisé par chaque méta-EPA secondaire. La caractérisation est faite de manière indépendante pour chaque méta-EPA secondaire tant qu'il n'existe pas de contraintes entre eux. Pour ce faire, les coefficients calculés en troisième étape du processus (P(PA secondaire ^ PA principale)) sont transformés en probabilités conditionnelles par la relation : $P(\text{PA Secondaire}/\text{PA Principale}) = \frac{P(\text{PA secondaire} \wedge \text{PA principale})}{P(\text{PA Principale})}$ où $P(\text{PA Principale})$ est calculé à l'étape 2. Ces probabilités conditionnelles sont utilisées pour choisir aléatoirement un PA dans chaque méta-EPA secondaire. Quand un produit est complètement défini par l'ensemble des méta-EPA secondaire, l'opération est répétée jusqu'à ce que le nombre de produits à fabriquer pour la période soit atteint. Les produits ainsi générés et enrichis sur l'ensemble des EPA constituent le PDP au niveau 0 de la nomenclature. Les quantités du PDP au-delà de l'horizon gelé sont considérées

comme certaines. Il devient alors assez simple, à partir de ces quantités, de réaliser des calculs de besoins en CA par l'utilisation de prédicats.

Les 4 étapes du processus d'enrichissement peuvent être synthétisées d'une manière algorithmique comme suit :

1. Constituer les méta-EPA (le Principal et les Secondaires)
2. Pour chaque période de l'horizon de planification
 - 2.1. Calculer les coefficients de prévision des combinaisons de PA du méta-EPA Principal
 - 2.2. Calculer les coefficients de prévision des combinaisons de PA des méta-EPA Secondaires
 - 2.3. Pour chaque méta-EPA Secondaire
 - 2.3.1. Pour chaque PA du méta-EPA Secondaire sélectionné :
 - 2.3.1.1. Calculer le coefficient de prévision de la combinaison de cette PA avec une PA du méta-EPA Principal
 - 2.3.1.2. Transformer le coefficient de prévision calculé en une probabilité conditionnelle en le divisant par le coefficient de prévision de la PA concernée du méta-EPA Principal
 - 2.4. Pour chaque produit
 - 2.4.1. Sélectionner une PA du méta-EPA Principal en fonction du coefficient calculé au 2.1
 - 2.4.2. Pour chaque méta-EPA Secondaire, sélectionner une PA en fonction des probabilités conditionnelles calculées au 2.3.1.2

La détermination du PDP au niveau 0 de la nomenclature présente l'avantage, en respectant les propriétés de cohérence physique des VCD, d'être « rassurantes » pour les praticiens de la chaîne logistique. Son utilisation à des fins de planification à moyen terme est perçue comme le simple prolongement de l'ordonnancement. Par construction, l'utilisation du VCD garantit des réquisitions de composants cohérentes entre elles au sens des contraintes techniques et commerciales. Si l'ordonnancement de la production au niveau des VCD est indispensable sur le court terme, une démarche de planification en VCD au-delà de l'horizon gelé donne l'illusion d'avoir affaire à une prévision certaine (identique à une commande client ferme) de la production à moyen terme.

En réalité, la recherche de la cohérence stricte, par le respect des contraintes techniques et commerciales, par une planification en VCD n'est pas sans conséquence sur la performance du pilotage de la chaîne logistique-amont. Les règles inhérentes au processus de déclinaison de la demande commerciale en VCD peuvent être à l'origine de graves perturbations qui se propagent en cascade le long de la chaîne logistique amont à l'origine de l'effet coup de fouet en CL-amont (Childerhouse et *al.*, 2008 ; Niranjana et *al.*, 2011). Ces perturbations sont essentiellement générées par la sélection aléatoire des PA (cf. étape 2.4 de l'algorithme) dans une planification glissante. En effet, la régénération de VCD à chaque mise à jour du PDP est à la source d'instabilité des prévisions et d'effet coup de fouet dans la partie amont de la chaîne logistique.

L'analyse détaillée du processus de génération de VCD utilisé par un grand constructeur automobile français, sommairement présenté dans cette section, a révélé l'existence de tels phénomènes (Sali 2012). Partant de nomenclatures de planification fournies par le commerce au niveau d'EPA, la solution retenue par ce constructeur pour générer un PDP au niveau des produits finis fait appel à des méthodes de programmation mathématique pour résoudre en cascade une série de problèmes d'optimisation sur chaque période de planification. En propageant des erreurs à chaque itération cette solution aboutit en pratique à des prévisions peu fiables conduisant à des ruptures de stock impliquant des dépannages d'urgences très coûteux, ou à du surstock pesant dans la trésorerie des compagnies.

6. Conclusion

Dans le contexte d'une production de masse fortement diversifiée, caractérisé par d'importantes restrictions dans la combinaison des nombreux composants alternatifs assurant cette diversité, la construction et l'usage des nomenclatures posent de redoutables problèmes méthodologiques. On a montré que l'explicitation de toutes les nomenclatures des produits susceptibles d'être fabriqués ne présentait pas d'intérêt en raison de la difficulté à retrouver la référence exacte d'un produit fini sans disposer préalablement de la liste des composants alternatifs qu'il comprend. Le respect de cette condition n'est pas possible dans l'expression par un client de ses besoins, à cause de la technicité requise et de l'existence de composants alternatifs qui lui sont cachés. La description d'un produit fini à partir d'une combinaison de prestations alternatives, correspondant à des caractéristiques fonctionnelles compréhensibles par le client et utilisables par la direction commerciale, constitue la seule alternative raisonnable à l'approche classique des nomenclatures. Cette nouvelle approche permet de créer la liste des composants alternatifs d'un produit fini à partir de prédicats utilisant les prestations alternatives retenues dans la définition du produit fini. Cette solution répond à l'ensemble des besoins opérationnels d'une entreprise. L'usage des EPA pour établir le PDP au-delà de l'horizon gelé est incontournable car la direction commerciale exprime nécessairement ses prévisions en termes de prestations. Le passage des prévisions en termes de PA à des prévisions en termes de CA ne peut se faire simplement dès lors qu'un CA est déterminé par plusieurs EPA. Deux formulations possibles du PDP sont décrites : la première, utilisée par plusieurs entreprises, revient à définir le PDP au niveau 0 de la nomenclature, la seconde travaille sur une définition du PDP au niveau 1. Ces deux solutions présentent des faiblesses difficiles à éviter et l'analyse de leurs performances respectives mérite d'être creusée.

Quelle que soit la solution retenue, l'accroissement de la diversité et l'allongement de la chaîne logistique ont un impact important sur la qualité des prévisions au-delà de l'horizon gelé. La dégradation de ces prévisions conduit la chaîne logistique à supporter des coûts additionnels induits par les ruptures de stocks et les mesures prises pour tenter de les éviter. D'un point de vue stratégique il convient de s'interroger sur l'origine de ces deux évolutions décidées pour accroître la marge de l'entreprise, sans vraiment anticiper leurs impacts sur le coût du pilotage

de la chaîne logistique. D'un côté, l'accroissement de la diversité résulte d'une pression de la direction du marketing qui postule que cette diversité, combinée à des modulations de prix, est attractive pour le client et plus rentable pour l'entreprise. D'un autre côté, l'étirement de la chaîne logistique est lié à une pression de la direction contrôle de gestion sur la direction des achats, pour baisser les coûts des approvisionnements.

Cette vision stratégique de la diversité et de l'intérêt d'un approvisionnement mondial de composants alternatifs sur des considérations de coûts a longtemps été très largement partagée par les grandes entreprises du secteur automobile du monde entier. Depuis quelques années, on observe sur le marché européen une certaine prise de conscience des constructeurs automobiles sur les impacts négatifs d'une trop grande diversité. La diversité offerte aux clients se réduit par des logiques de packs (pas de climatisation automatique sans lecteur CD) ou de suréquipement (vitres arrière électriques de série, ordinateur de bord de série...). Ces tendances semblent en Europe principalement venir des constructeurs asiatiques et notamment coréens. La logique *low-cost* a aussi fait son apparition ces dernières années et moyennant une baisse des niveaux de prestations offertes aux clients, cette stratégie permet aussi de produire des véhicules moins diversifiés.

Ces trois dernières tendances ont toutes pour but de réduire la diversité de produits finis offerts aux clients, mais pas suffisamment pour que l'on ne puisse plus parler de production de masse fortement diversifiée. Au cours de ces dernières années, les constructeurs réticents à trop réduire la diversité de l'offre commerciale ont également lancé, par des moyens divers, des logiques de rationalisation de la diversité de composants (CA) à iso-offre commerciale. La construction de produits modulaires en est sans doute le moyen le plus abouti. Par la standardisation des interfaces entre composants, la modularité peut réduire sensiblement le nombre de contraintes techniques à l'origine des problèmes rencontrés. Par ailleurs, la généralisation du partage de ligne d'assemblage par plusieurs modèles accélère aussi les conceptions de plateforme multi-modèles facilitant le partage de composants. Dans toutes ces réflexions de standardisation le constructeur qui semble le plus avancé est sans conteste le groupe Volkswagen qui vient de devenir le premier constructeur mondial.

En résumé, pour améliorer durablement leurs processus de planification dans un contexte de forte diversité, les entreprises disposent de leviers stratégiques qui ont trait à la conception des produits et de la chaîne logistique amont. La rationalisation de la diversité, pour limiter les cas de détermination impliquant un grand nombre de PA, suppose un effort de standardisation et de modularisation lors de la conception des produits et des CA qui le constituent. Pour pallier l'infaisabilité technique d'une modularité parfaite impliquant des interfaces complètement standardisées, le levier de conception de la chaîne logistique peut être mobilisé pour revenir à des approvisionnements de proximité impliquant des délais d'obtention inférieurs à l'horizon gelé pour les CA déterminés par plus d'un EPA. Ces solutions appliquées dans cet article à l'industrie automobile sont tout à fait applicables par d'autres industries faisant face aux mêmes problématiques de diversité de produits finis et de composants comme l'informatique ou la construction d'habitation.

Bibliographie

- Alblas A, Zhang L.L., Wortmann H. (2012). Representing Function-Technology Platform Based on the Unified Modelling Language, *International Journal of Production Research* vol. 50, n° 12, p. 3236-3256.
- Anderson, D. M., Pine II, J. (1997). *Agile Product Development for Mass Customization: How to Develop and Deliver Products for Mass Customization, Niche Markets, JIT, Build-to-Order and Flexible Manufacturing*, McGraw-Hill.
- Bertrand J.W.M., Zuijderwijk M., Hegge H.M.H. (2000). Using hierarchical pseudo bills of material for customer order acceptance and optimal material replenishment in assemble to order manufacturing of non-modular products, *International Journal of Production Economics*, vol. 66, n° 2, p. 171-184.
- Camisullis C. (2008). *Les déterminants de la capacité d'une chaîne logistique amont*. Thèse en Sciences de Gestion, Université Paris Dauphine, 12/3/2008.
- Camisullis C., Giard V., Mendy-Bilek G. (2010). *The information to share in upstream supply chains dedicated to mass production of customized products for allowing a decentralized management*, Cahier du LAMSADE, 296.
- Childerhouse P., Disney S.M., Towill D.R. (2008). On the impact of order volatility in the European automotive sector, *International Journal of Production Economics*, vol. 114, n° 1, p. 2-13.
- Date C.J. (2012). *Database Design and Relational Theory*, O'Reilly.
- Erens F.J., Hegge H.M.H. (1994). Manufacturing and Sales Co-Ordination for Product Variety. *International Journal of Production Economics*, vol. 37, n° 1, p. 83-99.
- Erens F., McKay A, Bloor S. (1994). Product Modelling Using Multiple Levels of Abstraction Instances as Types. *Computers in Industry*, vol. 24, n° 1, p. 17-28.
- Erens F., Wortman H. C. (1996). Generic Product Modeling for Mass Customization. *Implementation Road Map 96*.
- Garwood D. (1995). *Bills of Materials - Structures for Excellence* (5^e ed.) Dogwood Publishing Company, Marietta G.A
- Giard V., Camisullis C. (2010). Détermination des stocks de sécurité dans une chaîne logistique-amont dédiée à une production de masse de produits fortement diversifiés, *Journal Européen des Systèmes Automatisés (APII-JESA)*, vol. 44, n° 8, p. 975-1010.
- Giard V., Sali M. (2012). Pilotage d'une chaîne logistique par une approche de type MRP dans un environnement partiellement aléatoire, *Journal Européen des Systèmes Automatisés (APII-JESA)*, vol. 46, n° 1, p. 73-102.
- Hegge H.M.H. (1992). A Generic Bill-of-Material Processor Using Indirect Identification of Products. *Production Planning & Control*. vol. 3, n° 3, p. 336-42.
- Hegge H.M.H., Wortmann J.C. (1991). Generic bill-of-material: a new product model. *International Journal of Production Economics*, vol. 23, n° 1-3, p. 117-128.
- Jiao J., Tseng M.M., Ma Q., Zou Y. (2000). Generic Bill-of-Materials-and-Operations for High-Variety Production Management. *Concurrent Engineering: research and applications*, vol. 8, n° 4, p. 297-321.

- Kendall M. G. (1976). *Time series*, Griffin, London.
- Mather H. F. (1986). Design, Bills of Materials, and Forecasting—the Inseparable Threesome. *Production and Inventory Management Journal*, vol. 27, n° 1, p. 90–107.
- Niranjan T.T., Wagner S.M., Aggarwal V. (2011). Measuring information distortion in real-world supply chains. *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 11, p. 3343-3362.
- Olsen K. A., Saetre P. (1997). Managing Product Variability by Virtual Products. *International Journal of Production Research*, vol. 35, n° 8, p. 2093-2108.
- Olsen K.A., Saetre P. Thorstenson A. (1997). A procedure oriented generic Bill of Materials. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 32, n° 1, p. 29-45.
- Orlicky J.A., Plossl G.W., Wight O.W. (1972). Structuring the Bill of Material for MRP. *Production and Inventory Management Journal*, vol. 13, n° 4, p. 19-42.
- Pil F.K., Holweg M. (2004). Linking Product Variety to Order-Fulfillment Strategies, *Interfaces*, vol. 35, n° 5, p. 394-403.
- Romanos M. S. (1989). Demand forecasting for parts used in modular products; a case study, *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 17, n° 1-4, p. 231-244.
- Rusk P. S., Barber K.D. (1989). Structuring the Bills of Material for a Complex Make-to-Order Product (A Case Study). *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 15, p. 215-22.
- Sali M. (2012). *Exploitation de la demande prévisionnelle pour le pilotage des flux amont d'une chaîne logistique dédiée à la production de masse de produits fortement diversifiés*, Thèse en Sciences de Gestion, Université Paris Dauphine, 06/2012.
- Sali M., Giard V. (2015). Monitoring the production of a supply chain with a revisited MRP approach, *Production Planning & Control*, vol. 26, n° 10, p. 769-785.
- Stonebraker P. W. (1996). Restructuring the bill of material for productivity: A strategic evaluation of product configuration. *International Journal of Production Economics*, vol. 45, n° 1-3, p. 251-260.
- Tallon W.J. (1989). A Comparative Analysis of Master Production Scheduling Techniques for Assemble-To-Order Products. *Decision Sciences* vol. 20, n° 3, p. 492–506.
- van Veen E. A., Wortmann J. C. (1992). New developments in generative BOM processing systems. *Production, Planning & Control*, vol. 3, n° 3, p. 3327-335.

Article soumis le 10/12/2014

Accepté le 29/11/2015

