

ONZIEME RENCONTRE INTERNATIONALE DU GERPISA ELEVENTH GERPISA INTERNATIONAL COLLOQUIUM

Les acteurs de l'entreprise à la recherche de nouveaux compromis ?
Construire le schéma d'analyse du GERPISA

Company Actors on the Look Out for New Compromises
Developing GERPISA's New Analytical Schema

11-13 Juin 2003 (Ministère de la Recherche, Paris, France)

CONVERGENCE ET DIVERSITE DU PASSAGE A LA PRODUCTION MODULAIRE DANS L'AERONAUTIQUE ET L'AUTOMOBILE EN EUROPE

Vincent FRIGANT , Damien TALBOT

Université Montesquieu-Bordeaux IV

(GRES, IFReDE-E3i)

Récemment, le magazine scientifique *Science & Vie*, à l'occasion d'un numéro consacré aux futurs de l'automobile, posait la question de l'imitation technologique entre automobile et aéronautique autour du titre « qui copie qui ? » (*Science & Vie*, « Automobile 2002-2010 »). Industries d'assemblage de produits complexes, les ingénieurs aéronautiques et automobiles semblent mutuellement s'inspirer : les premiers cherchant à introduire les méthodes de production et de conception mis au point par les seconds ; les seconds puisant dans le catalogue des commandes électriques aéronautiques de nouvelles fonctionnalités de conduite inspirées de l'avionique et des modalités pour remplacer les liaisons hydrauliques et mécaniques (*by wire*). Assisterait-on alors à une forme de convergence technologique et organisationnelle entre ces deux industries qui, à bien des égards, diffèrent largement - que l'on songe à la taille des séries en jeu, aux modes d'accès aux clients ou encore au fonctionnement institutionnel du marché ?

Face à ces différences profondes, cette thèse d'une convergence suppose de ne pas s'en tenir à quelques faits saillants, ou anecdotiques, à l'image de ce que propose *Science & Vie*. La comparaison intersectorielle doit au contraire pouvoir s'appuyer sur un cadre analytique qui cherchent à saisir un mouvement général au delà des particularismes repérables. C'est dans ce but que nous proposons de mobiliser la problématique de la modularité.

Parmi d'autres options, les technologies *drive-by-wire* portent en elles les germes d'une redéfinition de l'architecture produit-automobile. En émancipant les ingénieurs de certaines contraintes technologiques, le passage à l'électrique ouvre des opportunités concernant l'architecture du véhicule ; liberté qui pourrait être utilisée pour en faire un produit modulaire. Cette hypothèse s'appuie sur le constat que d'ores et déjà, les constructeurs automobiles cherchent à « modulariser » leur produit. De fait, l'industrie aéronautique civile a largement puisé dans le *fly-by-wire* pour développer une architecture produit qui s'inspire des préceptes modulaires tels qu'ils se trouvent présentés dans la littérature.

L'architecture modulaire se présente comme un puissant réducteur de la complexité systémique (Simon, 1962) en offrant une décomposition en sous-systèmes autonomes qui sont connectés par des interfaces. Cette architecture produit, c'est-à-dire la manière d'agencer les composants d'un système, contribue à gérer la complexité croissante des produits dans des industries d'assemblage (Ulrich, 1995) qui sont confrontées, à l'instar de l'industrie automobile, à l'apparition de nouvelles technologies, telle l'électronique. Elle constitue donc une des modalités pour résoudre les problèmes de coordination découlant d'une dispersion des compétences (de plus en plus dissemblables) nécessitées par le jeu concurrentiel supposé ou avéré.

La modularité dépasse cependant la seule dimension technique. Pour certains, passer à la modularité requiert de repenser l'organisation d'ensemble des firmes sous peine d'échec (Baldwin, Clark, 2000) ; pour d'autres, la modularité constitue une opportunité pour reconsiderer le positionnement concurrentiel de la firme et déplacer le registre de la concurrence (Moati, 2001 ; Sanchez, Mahoney, 1996). Les deux se rejoignant dans l'hypothèse que la modularité est porteuse d'enjeux organisationnels majeurs où la technologie vient définir la forme organisationnelle. Une large partie des travaux soutient en effet que le choix d'une architecture produit conduit à l'adoption, plus ou moins contrainte selon les auteurs, d'une architecture organisationnelle spécifique que l'on se place au niveau intrafirme (Sanchez, 2000 ; Langlois, 2002) ou interfirme (Sturgeon, 2002 ; Langlois, 2003 ; Galvin, Morkel, 2001 ; Baldwin, Clark, 2000).

A ce titre, la notion de modularisation possède une dimension heuristique pour analyser l'hypothèse d'une convergence entre les industries automobile et aéronautique car elle suggère qu'un couple technologie/organisation se forme et se déforme lorsqu'il s'agit pour les acteurs de l'adopter. Dans cette perspective, l'objet de cet article est de présenter comment s'effectue le passage à la modularité dans les industries aéronautique et automobile en Europe. Pour ce faire, nous nous focaliserons sur la question de l'articulation des compétences tant celle-ci semble au centre des enjeux organisationnels et technologiques liés à la modularité (Lung, 2001).

La première section revient sur la définition de la production modulaire qui se présente comme une nouvelle matrice d'un modèle cohérent d'organisation des relations d'approvisionnement ; cohérence qui repose sur la mise en place d'un couple technologie/organisation idoine. Nous présentons ensuite sous forme de faits stylisés, la manière dont les deux industries, en Europe, tentent de s'inscrire dans une logique modulaire en distinguant ses deux dimensions, technologique puis organisationnelle. Au final, ces deux exemples soulignent que la modularité est un phénomène pluriel dans ses modalités d'adoption et que l'hypothèse de déterminisme technologique suggérée dans une partie des travaux sur la modularisation est à relativiser.

UNE GRILLE DE LECTURE PAR LA MODULARITÉ : D'UNE ARCHITECTURE TECHNIQUE A UNE ARCHITECTURE ORGANISATIONNELLE

La production modulaire possède deux dimensions intrinsèquement liées. S'il s'agit en première approche d'une manière renouvelée de concevoir et produire un bien, ce qui renvoie à une dimension technologique, elle possède également une dimension organisationnelle qui justifie que l'économiste s'y intéresse. Une large partie des travaux sur ce thème soutient en effet qu'il existe un isomorphisme entre l'architecture technique induite par l'adoption de la modularité et l'architecture organisationnelle chargée de mettre en œuvre la réalisation des produits modularisés.

La modularité comme une architecture produit

Fondamentalement, la modularité relève d'une démarche visant à décomposer les systèmes complexes. Il s'agit de scinder le produit final en une série de sous-ensembles, eux-mêmes simples ou complexes, qui sont reliés les uns aux autres par des interfaces standardisées. L'image du jeu de Lego® peut être reprise : chaque élément du jeu constitue un module dont les interfaces, les tenons et mortaises, sont standardisées et que l'on peut assembler à volonté, quelle que soit la forme de l'élément, pour former un système complexe. On perçoit alors qu'à partir du moment où la forme de chaque module et surtout les interfaces sont fixées, la modularité permet une large variété d'assemblage. Pour les produits industriels, la démarche sera bien évidemment plus compliquée puisqu'il s'agit de partir du résultat (le produit final supposé être un système complexe), de caractériser les modules et leurs interactions dans le but d'atteindre une (série de) fonctionnalité(s) globale(s).

Dans la mesure où chaque module peut lui-même être un assemblage de différents composants physiques, une définition de la modularité peut être proposée à partir de la notion d'architecture produit (Ulrich, 1995). L'architecture produit représente la manière dont sont agencés les éléments fonctionnels et les composants physiques formant le système global (le produit). Caractériser l'architecture d'un produit conduit alors à spécifier :

1. la manière dont sont agencés les différents éléments fonctionnels du système complexe. Cet agencement détermine la performance globale du produit ;
2. la manière dont s'effectue la transposition de ces éléments fonctionnels en composants physiques. Ce sont ces derniers qui sont concrètement intégrés dans le produit. Les questions essentielles ici sont de savoir si une fonction doit/peut être remplie par un seul ou plusieurs composants ;
3. la manière dont sont reliés les composants entre eux et avec le système global. On s'interroge alors sur les interfaces qui régissent les interactions physiques entre les composants. Ces interfaces sont dites couplées si une modification d'un composant implique une modification subséquente chez le composant relié. Elles sont dites découpées si un changement dans un composant n'implique pas de changement dans l'autre.

Dès lors, une architecture est modulaire lorsqu'il existe, d'une part, une identité entre composant physique et fonction, et d'autre part, un découplage des interfaces reliant les composants. A l'inverse, une architecture produit est qualifiée "d'intégrale" lorsqu'il n'est pas possible d'associer un composant physique à une fonction et/ou que les interfaces entre les composants sont couplées.

Le découplage des interfaces est central ici puisqu'il autorise qu'un module particulier soit séparément développé, pré-assemblé et modifié, sans entraîner une modification des autres modules ni la redéfinition du produit dans sa globalité. La mise en œuvre d'une architecture modulaire sera ainsi souvent recherchée lorsqu'il s'agira d'introduire de nouvelles fonctionnalités ou de nouvelles technologies dans un produit donné. On comprend dès lors l'intérêt qu'éprouvent à l'égard de la modularité les firmes des secteurs où :

- le processus concurrentiel repose sur la recherche de différenciation, comme l'automobile par exemple ;
- la durée de vie du produit est particulièrement longue et/ou les conditions d'utilisation sévères, ce qui exacerbe les contraintes de maintenance et/ou requiert des programmes de remises à niveau technologique (*upgrading*), comme dans l'aéronautique ;

- les normes réglementaires et contraintes technologiques concernant certaines fonctionnalités du produit sont instables et, à ce titre, susceptibles d'évoluer.

En effet, l'architecture modulaire rend aisée les modifications incrémentales du produit au cours de son cycle de vie. R. Langlois et P. Robertson (1992) expliquent ainsi que dans la production électronique, les produits lancés dans un premier temps sur le marché sont ultérieurement réadaptés en fonction des demandes exprimées *ex post* par le marché. De manière plus générale, la modularité permet d'accroître le nombre de variantes (modèles) des produits dans le cadre d'une stratégie de différenciation de l'offre (Schaefer, 1999) tout en réduisant les délais de mise sur le marché grâce au raccourcissement des délais de conception des produits qu'elle induit (Ulrich, 1995 ; Sussman, Guinan, 1999 ; Baldwin, Clark, 2000). Profiter de ces opportunités suppose néanmoins d'avoir mis en phase une organisation adéquate (Sanchez, Mahoney, 1996) : l'utilisation efficace de l'architecture produit modulaire suppose de concevoir une forme d'organisation également modulaire.

La dimension organisationnelle de la modularité

La modularité porte en elle-même les germes d'un approfondissement de la division du travail dans la mesure où l'architecture produit modulaire autorise un découplage des tâches, en conception et en production, sur chacun des modules pris séparément. Dès lors, la firme verticalement intégrée céderait la place sous le poids des facteurs qui poussent à la désintégration verticale (Langlois, 2003) aboutissant à la définition d'une structure organisationnelle que nous qualifierons de modulaire.

Cette désintégration verticale trouve ses fondements dans la simplification des composantes de la coordination liées au développement, à la production et à la modification du produit. En effet, dans une architecture strictement modulaire, deux types d'acteurs sont identifiables. Le premier est l'architecte du produit. Sa fonction consiste à définir les caractéristiques générales du produit et à spécifier les interfaces. Le second a pour fonction de développer et de produire les modules.

Le point important est que l'architecte n'a plus besoin de connaître les caractéristiques intrinsèques des modules. Baldwin et Clark (2000) introduisent à ce titre une distinction utile entre éléments visibles et invisibles. Le rôle de l'architecte se limite à la définition des éléments *visibles* du système. Ils concernent les points de rencontres entre les composants, c'est-à-dire les interfaces, et, plus généralement les spécifications fonctionnelles et physiques (taille, poids) qui sont allouées aux modules. Dans cette perspective, le contenu même d'un module que ce soit dans l'agencement physique de ses composants (et leurs propriétés intrinsèques), ou dans l'agencement fonctionnel des sous-systèmes incorporés dans ce module, peuvent demeurer *invisibles*. Autrement dit, toutes les parties liées au développement du produit n'ont pas besoin de détenir l'ensemble des informations pour réaliser leurs propres tâches. Dès lors, la modularité favorise une division du travail entre plusieurs équipes, au moins pour les décisions détaillées, spécialisées sur tel ou tel type de fonctionnalité ou de matériaux.

L'intérêt de la modularité est donc de concilier spécialisation des tâches et autonomie des équipes impliquées dans la conception/production ce qui devrait accroître l'efficacité d'ensemble, notamment parce qu'elle accélère l'exploitation des apprentissages dynamiques de compétences désormais plus focalisées (Sanchez, Mahoney, 1996). En effet, la spécialisation induit une reconfiguration du registre des compétences à mobiliser (Brusoni, Prencipe, 2001). Ainsi, l'architecte doit posséder des connaissances liées à la définition de

l'architecture produit, notamment les connaissances techniques relatives d'une part à l'identification des interactions entre modules et d'autre part à leurs fonctions propres, mais aussi des connaissances marketing qui lui permettent de concevoir des produits commercialement viables. Les responsables de modules vont quant à eux recentrer leurs compétences sur celles directement liées à la production des éléments particuliers dont ils ont la charge.

La modularité infléchit dès lors l'arbitrage entre division et centralisation des tâches résultant de la contrainte de coût associée à la transmission, au recueil et traitement de l'information, dans la mesure où la coordination peut, *théoriquement*, se faire par la mobilisation de canaux de communications relativement simples basés sur les technologies de l'information (Sanchez, 2000). Ces canaux relient le nœud décisionnel en matière de conception de l'architecte produit et les autres unités chargées du développement ou de la production. Même dans les situations où les technologies de l'information ne suffisent pas à assurer la coordination cognitive, la mise en place de structures plus complexes, telles des équipes projets, doit pouvoir se réaliser plus aisément et à un coût inférieur à celui d'une architecture intégrale compte tenu de la moindre quantité d'informations à diffuser (éléments visibles) et grâce à la réutilisation de modules antérieurement mis au point.

La simplification des processus de coordination sur ce plan cognitif - couplée à la dynamique d'émulation qui émane d'une mise en concurrence des différents fournisseurs de modules (Veloso, Fixson, 2001) - favorise alors la désintégration verticale (Langlois, 2003 ; Sturgeon, 2002). L'architecture produit induit la constitution d'une architecture organisationnelle elle aussi modulaire, dans laquelle :

- le vendeur du produit final, « l'intégrateur » (Brusoni, Prencipe, 2001), est l'architecte du produit et pilote un réseau de fournisseurs de module ;
- des « modules organisationnels » émergent : il s'agit des fournisseurs situés aux différents stades amont du processus de production qui prennent en charge le développement et la production des modules (au sens technique, i.e. les sous-systèmes) ;
- des « interfaces organisationnelles » sont constituées : elles correspondent aux divers procédés de coordination inter-firmes mis en place.

Finalement, la modularité relève de deux dimensions intimement liées. Si elle se présente comme un procédé d'ingénierie visant à réduire la complexité des systèmes techniques, elle implique une restructuration organisationnelle afin de tirer partie des opportunités d'approfondissement de la spécialisation des agents. Si les industries informatique (Baldwin, Clark, 2000 ; Sturgeon, 2002), électronique (Langlois, Robertson , 1992) et du cycle (Galvin, Morkel, 2001) semblent en premier avoir exploitées cette double opportunité, de nombreuses autres cherchent à s'inscrire dans ce mouvement. Néanmoins, les modalités de ce passage diffèrent selon les industries, ainsi que nous allons le voir pour l'aéronautique et l'automobile.

LES TRAJECTOIRES INVERSEES DE L'ADOPTION DE LA MODULARITE DANS L'AERONAUTIQUE CIVILE ET L'AUTOMOBILE EN EUROPE

Les arguments soulignant l'efficacité de l'architecture modulaire comparativement à l'architecture intégrale suscitent l'intérêt de nombreuses firmes. Des secteurs auparavant peu structurés autour de ce type d'architecture produit cherchent depuis quelques années à la mettre en œuvre. L'aéronautique et l'automobile européennes n'y échappent pas. Néanmoins, cette adoption relève d'un processus de transformation d'autant plus complexe à accomplir qu'il s'agit d'un processus dual, technique et organisationnel, concernant l'ensemble des domaines de la création de ressources (conception/production/distribution ; intra et interfirmes). Dans cette perspective, le processus d'adoption emprunte des trajectoires différentes selon la situation initiale des secteurs, que ce soit dans leurs configurations architecturales ou dans les rapports de force entre les différentes parties mobilisées dans cette problématique d'adoption. De fait, les trajectoires de l'adoption de la modularité dans l'aéronautique civile et l'automobile en Europe s'opposent d'un point de vue technique et organisationnel.

L'aéronautique civile : une dimension technique affirmée, une dimension organisationnelle en voie d'émergence

L'avion: une famille de produit

D'un point de vue technologique, concevoir et produire un avion relève d'un processus complexe dont un indicateur est le nombre de composants qu'il convient de faire fonctionner de manière cohérente : un Airbus nécessite ainsi plus de deux millions d'éléments (rivets compris). Très vite, les avionneurs, notamment européens, ont cherché à gérer cette complexité en décomposant l'aéronef en une série de modules relativement indépendants reliés par des interfaces plus ou moins standardisés et stables. De façon non exhaustive, il est possible de subdiviser un avion de ligne en quelques modules principaux présentant une fonction clairement identifiable (chacun se décomposant lui-même en sous-modules). A chaque fois, nous présentons un exemple d'interfaces dites découplées, connections qui peuvent être tout autant de nature mécanique qu'électrique:

- l'avionique, qui renvoie à l'intégration des systèmes de pilotage et de navigation, constitue le cœur du système Avion. Les interfaces sont très nombreuses, à l'instar des commandes de vol, ou encore de l'alimentation électrique ;
- divers modules comme le fuselage (divisé lui-même en tronçons), les empennages horizontaux et verticaux, ou encore la voilure constituent le corps physique du produit et sont reliés entre eux par de simples fixations mécaniques;
- les moteurs, rattachés à la voilure par les nacelles et les mâts réacteurs grâce à des connections mécaniques et électrique ;
- le train d'atterrissement, relié directement au fuselage.

Sur la base de cette architecture modulaire, Airbus et Boeing ont développé une gamme d'avions de plus de 100 places dans laquelle chaque modèle partage avec d'autres certains modules, alors que Dassault fait de même pour ses avions d'affaires Falcon, également décomposés en gamme. Il s'agit là de concevoir, de produire, d'assembler et de faire fonctionner des appareils de façon relativement similaire tout en respectant la nécessaire diversité des produits (Salvador, Forza, Rungtusanatham, 2002). Ainsi, les modèles

A318/A319/A320/A321 et A330/A340 possèdent le même tableau de bord, les mêmes procédures de pilotage, la même avionique et les mêmes systèmes. Quasiment aucune différence n'apparaît donc dans les cockpits. Au sein des A318/A319/A320/A321, la voilure est identique, seule la longueur du fuselage (et par-là même le nombre de place) variant. Le principe est le même pour les A330/A340, le nombre de moteurs étant lui aussi variable (de deux à quatre). Enfin, sur chaque type d'appareil de dernière génération, deux ou trois motorisations sont proposées suivant les offres des motoristes afin de répondre aux exigences opérationnelles des compagnies, ce qui suppose une standardisation des interfaces entre les modules moteur et nacelle afin d'accueillir l'ensemble des capacités opérationnelles des différents moteurs (Bonaccorsi, Giuri, 2001). En revanche, les jets commerciaux de première génération, comme le B707, le DC-8 ou encore la Caravelle, ne bénéficiaient que d'une seule motorisation. Finalement, grâce à l'aspect modulaire du produit, Airbus et dans un second temps Boeing ont pu développer le concept de « familles », au sein de laquelle l'architecture du produit et les différentes interfaces sont partagées par l'ensemble des déclinaisons, ces déclinaisons étant elles-mêmes assurées par le changement de quelques modules (Erens, Verhulst, 1997 ; Frenken, 2000). Ce principe présente l'avantage de permettre l'évolution de chacun des sous-systèmes, sans que la définition globale d'un produit à longue durée vie ne soit remise en cause. Ainsi, il apparaît que deux appareils ne sont jamais totalement identiques, chacun comportant des évolutions mineures. Et plus généralement, chaque programme, qui peut s'étendre sur une quarantaine d'année, connaît des transformations techniques parfois importantes durant cette période (mais analytiquement incrémentale au sens de Henderson, Clark, 1990), sans que l'architecture initiale du produit ne soit modifiée (à l'instar du B747).

La dimension organisationnelle : l'avionneur, d'un architecte intégré à un architecte modulaire ?

Si ces dernières années se sont traduites par une profonde recomposition des relations verticales interfirmes dans le secteur aéronautique, l'essentiel des mutations est encore en devenir. Traditionnellement, ces relations sont décrites sous la forme d'un réseau captif au sens où autour des grands donneurs d'ordres gravitent un réseau d'entreprises sous-traitantes (Jalabert, 1974). L'avionneur, point focal du flux d'approvisionnement, l'est également au niveau de la conception. En effet, il assure en interne la définition globale de l'avion et la conception détaillée des sous-ensembles qui le composent. Pendant longtemps, être un avionneur signifiait maîtriser en interne l'ensemble de la filière y compris au niveau des moyens de production. Les tâches externalisées l'étaient sur la base d'un cahier des charges où l'ensemble de la spécification des produits mais aussi des moyens à utiliser étaient définis par le donneur d'ordres, à l'instar du programme Concorde.

A partir de la fin des années quatre-vingt, les avionneurs, commencent à remettre en cause ce modèle de sous-traitance (Larré, 1994). Ils accroissent le recours à la sous-traitance de spécialité, les normes de sélection évoluent vers des aspects plus organisationnels (certification qualité, disponibilités financières) et les cahiers des charges deviennent fonctionnels. Ces évolutions ne doivent cependant pas masquer que, à de rares exceptions près notamment dans le domaine de l'électronique embarquée, l'avionneur reste le centre d'un réseau de sous-traitants qui tend tout juste à prendre une forme plus pyramidale (réduction du nombre de fournisseurs, élargissement des critères de sélection, achat de sous-ensembles et non plus de simples composants) sans que soit remise en cause sa prédominance, notamment au niveau de la définition détaillée des sous-ensembles dont il ne délègue que marginalement la conception. Malgré la nature modulaire de l'aéronef, on se

retrouve face à une structure très centralisée où l'avionneur contrôle en interne la conception (Talbot, 1998).

Une nouvelle étape se fait jour actuellement autour des grands programmes en devenir sous le jeu de plusieurs facteurs. Premièrement, on note une profonde évolution de l'objet avion qui se complexifie. La composante industrielle de l'avion (la cellule) voit son importance, quantitative et qualitative, diminuer au profit des systèmes (Kechidi, 1996) : un avionneur ne peut dès lors maîtriser l'ensemble des systèmes compte tenu du spectre de compétences non similaires (Richardson, 1972) qu'il devrait acquérir. Aussi tend-il à se recentrer sur ses compétences foncières et à se borner dans un rôle d'architecte, conservant l'industrialisation des pièces de structure. Deuxièmement, apparaît un phénomène d'apprentissage technologique et organisationnel. Au niveau technologique, la centralisation des compétences chez les avionneurs a permis d'affiner le degré de connaissance sur la complexité systémique du produit et les interfaces entre les principaux modules. Ces compétences rendent possible l'externalisation des modules puisque la technologie est stabilisée et la complexité systémique du produit mieux comprise par l'architecte (*cf.* Brusoni, Prencipe, Pavitt, 2001 sur les réacteurs). A cela s'ajoute qu'au niveau organisationnel, la délégation croissante en œuvre à partir des années quatre-vingt-dix a permis aux fournisseurs de développer leurs capacités à intervenir en conception alors même que s'est effectué un apprentissage mutuel du travail en coopération le long de la filière. Troisièmement, afin faire face à des dépenses de R&D toujours croissantes dans un contexte de plafonnement du potentiel des ressources traditionnelles, les constructeurs recherchent des économies en coût et en temps dès la phase de développement du produit jusqu'au service après-vente (Haas, Larré, Ourtau, 2001) : la mobilisation de l'ensemble des ressources disponibles, en particulier celles présentes chez les fournisseurs, est à l'ordre du jour.

C'est dans cette perspective que le passage à ce que nous dénommons une organisation modulaire se fait jour. Que ce soit chez Airbus ou chez les autres constructeurs aéronautiques, en France (Dassault) ou à l'étranger (AECMA, 2002 ; Amesse *et al.*, 2001 ; Belussi, Arcangeli, 1998), on assiste à une recomposition de la pyramide des approvisionnements dont les traits généraux sont : 1) une réduction drastique du nombre de fournisseurs directs ; 2) qui se voient confier la charge complète de la conception et de la production des modules dont ils obtiennent la responsabilité ; 3) la généralisation des pratiques de risk-sharing. Le développement du nouvel A380 d'Airbus ou du Falcon 7X de Dassault sont représentatifs des nouvelles tendances en matière de répartition des rôles intra et interfirmes. Dans ces deux programmes, les avionneurs ont pris le parti d'accroître les responsabilités confiées aux équipementiers. Les avions ont été décomposés en un petit nombre de modules dont la responsabilité, aussi bien en matière de conception que de production, incombe à un équipementier. Dans le cas d'Airbus, on estime que les composants de l'A380 ne seront fournis que par une cinquantaine d'équipementiers (*Usine nouvelle*, n°2783, juin 2001), ces derniers prenant en charge 30% des 10 milliards d'euros de dépense de R&D (Haas, Larré, Ourtau, 2001).

Désormais, accéder en direct à l'avionneur exige de participer au financement des investissements de R&D et d'assumer ces responsabilités jusqu'à la certification de l'appareil. Cela signifie que l'équipementier se voit doter d'une certaine autonomie technique et industrielle, notamment dans les modes opératoires, afin d'atteindre un résultat imposé. Pour l'avionneur, il s'agit d'externaliser des modules qu'il recevra fabriqués, protégés, contrôlés, bref prêts à monter. En outre, les investissements immatériels et matériels seront amortis sur un nombre précis d'avions -l'équipementier obtenant l'exclusivité de la charge de travail- et ce n'est qu'au-delà de ce chiffre qu'il peut espérer réaliser un profit.

Ce mouvement d'externalisation, et la décomposition des compétences qu'il induit, suppose néanmoins la construction de dispositifs collectifs de coordination élaborés, permettant à l'avionneur de conserver la maîtrise de la relation tout au long du processus de conception et de production. En amont, le système puise sa cohérence dans une harmonisation des outils de conception (matériels et logiciels de CFAO), de la mise en place d'une ingénierie concourante mais aussi d'une homogénéisation des méthodes de formation, de support et de documentation ; l'ensemble se prolongeant par la mise en place d'équipes de projets mixtes entre avionneurs et équipementiers. Illustrant cette transformation organisationnelle, c'est à l'occasion du développement de l'A340-500/600 en 1997 qu'Airbus a développé sa première équipe plateau. L'A380 approfondit cette organisation avec la construction d'un plateau d'un millier d'ingénieurs et de techniciens à Toulouse où seront réunis les personnels de l'avionneur et des équipementiers (*Air & Cosmos*, n°1849, juin 2002). Il s'agit également d'assurer la cohérence des flux d'intrants ce qui passe par une mise en liaison informatique entre les différents sites des avionneurs et de leurs principaux fournisseurs. Illustrant que ces transformations relèvent plus d'une évolution que d'une rupture, l'interconnexion informatique s'inscrit dans un mouvement amorcé au début de la décennie quatre-vingt-dix lorsque Aérospatiale cherche à mettre en réseau l'ensemble de ses sous-traitants (démarche Greenloop) afin d'introduire l'approvisionnement en flux tendus : les plans d'approvisionnement et les appels de livraison sont générés automatiquement au niveau des applications informatiques du donneur d'ordres et transmis au sous-traitant par EDI.

Au total, la complexité du produit empêchant sa maîtrise complète, l'externalisation de la conception et de la réalisation de certains modules constitue une réponse possible, ce qui suppose au préalable une maîtrise technique et organisationnelle des interfaces par l'architecte. L'exemple de l'aéronautique civile, et plus particulièrement d'Airbus que nous avons mis en exergue, démontrerait que l'adoption d'une architecture produit modulaire suscite l'adoption d'une architecture organisationnelle symétriquement modulaire où, autour d'un architecte, concepteur/assembleur de cellules, vient d'une part se constituer un réseau d'équipementiers de premier rang qui a pour fonction de concevoir et produire en totalité des modules, et d'autre part se mettre en place diverses interfaces organisationnelles (ingénierie concourante et équipe plateau en conception ; informatisation des flux opérationnels en production). Tout autre nous semble la trajectoire de l'industrie automobile.

La modularité dans l'automobile européenne : une dimension organisationnelle affirmée, une dimension technique en émergence

Si l'automobile semble n'avoir que peu évolué depuis sa création, l'industrie se caractérise néanmoins par un rythme élevé d'innovations qui concernent aussi bien les produits que les processus de production (Hatchuel *et al.*, 2002) : à ce titre, la production modulaire figure actuellement au cœur des perspectives des constructeurs. Si on peut y voir ici un parallèle avec l'industrie aéronautique, celui-ci s'arrête néanmoins là dans la mesure où selon notre grille de lecture fondée sur le couple technologie/organisation, la trajectoire d'adoption semble inverse. Dans l'industrie automobile en effet, le point crucial pour les acteurs de la filière consiste à décomposer techniquement le produit voiture, alors qu'au niveau organisationnel, il est plus facile de soutenir que l'architecture modulaire est déjà globalement en place.

La dimension technique : l'automobile, un produit modulaire en devenir ?

Les premières automobiles fabriquées au début du siècle précédent l'ont été selon une démarche modulaire (McAlinden *et alii*, 1999). Plus tout à fait artisan ni tout à fait industriel, les fabricants d'automobiles se présentaient comme des architectes produits dont le métier consistait à concevoir le véhicule et à assembler des composants achetés à l'extérieur. Cependant, le passage à la production de masse a conduit ces constructeurs à modifier leur fonction. Les opportunités offertes par les économies d'échelle et les contraintes liées à la gestion de flux d'approvisionnements de plus en plus complexes d'une part, et les exigences croissantes des consommateurs à l'égard de la qualité du produit (confort, fonctionnalités) d'autre part, ont justifié une première reconfiguration de la production automobile autour de la firme intégrée et d'un produit intégral. Ce dernier présente effectivement une architecture intégrale dans le sens où il constitue un assemblage d'une pluralité de composants qui recouvrent pour la plupart d'entre eux plusieurs fonctions. De plus, entre ces éléments physiques que forment les composants, les interfaces ne sont qu'imparfaitement stabilisées. Dès lors, si quelques composants sont encore modulaires, l'automobile s'apprehende comme un produit-système (Clark, Fujimoto, 1991).

Une automobile moderne résulte d'un assemblage de composants de taille et de valeur plus ou moins importantes (15000 à 20000 pièces selon les modèles) dont l'ensemble assure des fonctions spécifiques (porter/protéger : la carrosserie ; assurer le mouvement : groupe motopropulseur, etc.) qui, au terme de l'assemblage final, constitue le véhicule (Chanaron, Lung, 1995). La différence essentielle avec un avion provient du double fait que l'identité entre composants et fonctions y est plus faible et que les interfaces d'un modèle de véhicule à l'autre tendent à y être reconSIDérées systématiquement. Ainsi, la tenue de route dépend d'une multitude de paramètres (empattement, aérodynamisme, propulsion) qui oblige à concevoir des solutions adéquates et spécifiques à chaque modèle concernant les sous-systèmes qui ont pour objet d'assurer la tenue de route (type de pneu, amortisseur, train avant et arrière, etc.). Il en résulte qu'une automobile est un produit système composé lui-même de sous-systèmes qui ont la particularité d'être physiquement disjoints.

Un des points délicats du passage à la production modulaire provient de cette disjonction. En effet, les sous-systèmes fonctionnels sont souvent répartis en plusieurs endroits du véhicule. Ainsi le système de freinage implique des éléments du cockpit (pédale notamment), du train avant et du train arrière, sans compter les composants chargés d'assurer la transmission de l'information sur le fait de freiner et les calculateurs électroniques répartis en différents endroits. Dans cette perspective, le passage à la modularité repose sur un double défi. D'une part, parvenir à décomposer et recomposer le véhicule autour de modules qui, bien qu'ils ne pourront jamais correspondre à une architecture modulaire pure au sens de Ulrich (1995), soient physiquement intégrés dans des sous-systèmes physiques pluri-fonctionnels. Les ingénieurs s'orientent vers une redéfinition du véhicule autour d'ensembles physiques compacts : châssis, ensemble roue-pneu, systèmes d'échappements, cockpit, système de direction... D'autre part, parvenir à assurer une compatibilité entre ces différents modules afin de respecter la contrainte d'intégrité du produit (Clark, Fujimoto, 1991) qui est d'autant plus forte dans l'automobile que les conditions d'utilisation sont plus variées que pour un avion, ne serait-ce parce que les types de conduites sont hétérogènes. Malgré ces difficultés techniques, la modularisation se trouve pour l'instant au cœur des préoccupations des acteurs de l'industrie automobile parce que l'organisation de ladite industrie pousse à son adoption.

La dimension organisationnelle : l'architecture produit poussée par l'organisation

Les transformations que nous avons décrites dans le cadre de l'industrie aéronautique au niveau organisationnel, sont plus largement et anciennement répandues dans le secteur automobile. Dès la moitié des années quatre-vingt, il est souligné qu'un fondement clé de la compétitivité des constructeurs japonais réside de leur mode d'organisation des relations verticales (Lecler, 1993). Face à l'ouverture croissante des frontières, les constructeurs européens se lancent dans un processus d'adoption par hybridation des pratiques japonaises (Boyer *et alii*, 1998). Ceci se traduira par une externalisation poussée et une réduction drastique du nombre de fournisseurs et une plus grande sélectivité. Parallèlement, les constructeurs accroissent les pratiques de délégation de conception même si, à l'époque, les pratiques sont plus portées sur le co-design que sur une externalisation complète (Lung, Volpato, 2002).

Relativement à l'industrie aéronautique, la structure des relations verticales est ainsi plus rapidement organisée sous forme pyramidale. De nos jours, la filière s'organise ainsi autour d'équipementiers de taille internationale qui collaborent avec l'ensemble des constructeurs mondiaux sur différents modèles. Ces équipementiers, qualifiés de rang 1 voire 0.5, prennent en charge la totalité de la conception et de la production des sous-systèmes, et trait nouveau par rapport aux premières évolutions, ce sont eux qui proposent des alternatives techniques pour les équipements entre lesquelles les constructeurs arbitrent. Ces derniers se sont en effet globalement retirés de la conception détaillée et s'efforcent de réduire ce type d'activité en interne. Clairement, les constructeurs visent à se recentrer sur leur cœur de métier : définir l'architecture globale des voitures et leur(s) positionnement(s) de marché.

Compte tenu de la nature systémique des voitures, les firmes ont, au fil de l'évolution de leurs relations, développé de multiples lieux et procédures d'interconnexion de telle sorte qu'elles tendent à *s'imbriquer* organisationnellement (Laigle, 1996). La cohérence du produit final implique en effet une étroite coordination dans les phases de conception et de production. Bien qu'elles soient juridiquement autonomes, l'imbrication procède d'une volonté de reconstituer une "intégration virtuelle" dans le but de faciliter les échanges de connaissances (Coriat, 1997). Au niveau amont, les méthodes d'ingénierie concourante se sont généralisées afin d'assurer la cohérence d'une division du travail particulièrement poussée entre de nombreux acteurs. Ainsi, la constitution d'équipes projets mêlant les différents fournisseurs et le client participe à la reconstruction d'une cohérence de la firme désintégrée (Segrestin, Lefebvre, Weil, 2002). En aval du cycle, la généralisation de l'EDI et l'accroissement des tâches confiées aux transporteurs, désormais devenus les véritables gestionnaires des flux physiques de produits, facilite l'étroite coordination des flux d'approvisionnement. Néanmoins, la logique de *Just-in-sequence* portée par la modularité alors même que les modules deviennent plus volumineux et fragiles à transporter, requiert souvent une concentration spatiale des équipementiers auprès des usines d'assemblage des constructeurs afin d'assurer la fiabilité de la coordination des flux physiques. Concentration spatiale qui permet en outre d'améliorer la coordination cognitive interfirms tout en créant un engagement bilatéral crédible renforçant l'efficacité productive de l'externalisation (Frigant, Lung, 2002).

Finalement, le mouvement d'externalisation insufflé depuis de nombreuses années a eu pour conséquence de structurer le système le rendant proche d'une architecture organisationnelle modulaire. Dans cette perspective, et en dépit des difficultés, développer une architecture produit modulaire constitue une opportunité pour d'approfondir ce type d'organisation. La modularité dans son versant technique se trouve au point de convergence des intérêts respectifs des constructeurs et des équipementiers.

Côté constructeurs, figurent tout d'abord les avantages que nous avons énoncés en termes de différenciation des modèles, avec l'opportunité de pouvoir généraliser la différenciation retardée des produits, tout en réduisant les délais de développement et le montant des immobilisations en capital (Sako, 2002). Comme dans l'industrie aéronautique, elle constitue une modalité pour gérer la complexité croissante des compétences à maîtriser compte tenu de l'immixtion de nouvelles technologies dans la voiture imposées par le jeu concurrentiel (généralisation de l'électronique par exemple) ou par le jeu réglementaire (techniques non polluantes) (Lung, Volpato 2002). L'incompatibilité entre les contraintes de focalisation des compétences et cette diversification pousse alors à faire appel à des fournisseurs de modules spécialisés qui pourront bénéficier d'économies d'échelle et d'apprentissage plus importantes par le fait qu'ils fourniront leurs modules, relativement, standardisés à différents constructeurs.

De l'autre côté, les équipementiers y trouvent une opportunité de capter une part plus grande de la rente au sein de la chaîne de valeur en devenant des fournisseurs en source unique de composants à plus forte valeur ajoutée. Simultanément, ils accroissent leur pouvoir de négociation vis-à-vis des constructeurs pour les opérations de première monte, tout en renforçant leur présence sur le marché des pièces de rechange où les marges sont supérieures (Jullien, 2002). Cette stratégie, dans laquelle les équipementiers particulièrement européens et américains se sont engagés, n'est cependant pas exempte de risques car :

- elle les conduit à supporter une part croissante du risque industriel et financier alors même que leurs conditions d'accès aux capitaux sont moins favorables que celles des constructeurs (Sako, 2002) ;
- elle les oblige à élargir considérablement le registre de leur compétences ce qui, dans le contexte actuel de course à la modularité, favorise le recours à la croissance externe (Frigant, Lung, 2001) dont la réussite n'est pas forcément garantie.

Si des mutations sont encore à attendre dans l'organisation des constructeurs dans leur rôle d'architecte, des équipementiers dans leur statut de fournisseurs de modules et dans les modalités d'articulation des connaissances entre les deux (Gerpisa, 2002 ; Lung, 2001), il n'en demeure pas moins que c'est, à la fois, parce les différents acteurs ont déjà pu apprendre à gérer une large division du travail par le passé et parce que l'architecture produit modulaire ouvre de nouvelles opportunités économiques, que l'ensemble des firmes de la filière pousse à son adoption. En ce sens, on retrouve une trajectoire inverse à celle de l'aéronautique : une architecture organisationnelle relativement déjà modularisée qui cherche à aller vers une architecture produit modulaire.

CONCLUSION

Les industries automobile et aéronautique font l'objet d'une profonde restructuration dans leur manière de concevoir leur produit et d'organiser leurs relations d'approvisionnement. Il nous a semblé qu'un point de convergence se situait dans la recherche de modularité, qu'elle soit technique ou organisationnelle au sens où nous l'avons défini. Néanmoins, ce mouvement de convergence emprunte des chemins différenciés¹.

¹ Chemin dont il convient par ailleurs de ne pas préjuger qu'il aboutira au même point d'arrivée ni même qu'il se poursuivra puisque certaines limites tant au point de vue organisationnel que technologique

Lorsqu'on raisonne au niveau sectoriel, le passage à la modularité dans l'aéronautique concerne essentiellement l'adaptation de l'architecture organisationnelle à l'architecture produit déjà pré-existante, alors que pour l'automobile il s'agit de trouver les voies techniques de l'élaboration d'une architecture modulaire à partir d'une architecture organisationnelle qui est globalement déjà structurée sous forme modulaire.

Ces trajectoires différencieront amènent par ailleurs à questionner certains travaux sur la modularité qui surdéterminent le rôle de la technologie sur l'organisation. Ou plutôt, elle met au jour le danger des liens de causalité par trop linéaires. Quand bien même on accepte l'hypothèse que la modularité constitue l'objectif des deux industries, on constate que son adoption, dans ses deux composantes techniques et organisationnelles, apparaît comme la résultante :

- des configurations actuelles et passées des deux industries, notamment l'état de la structure de l'industrie (types d'acteurs, rapport de force) et de la stratégie des firmes ;
- des caractéristiques hétérogènes des produits (que l'on pense au volume produit ou encore aux utilisateurs) ;
- du rythme des apprentissages technologiques et organisationnelles en œuvre aux niveaux intrafirme et interfirme.

En ce sens, nos résultats retrouvent ceux d'autres travaux qui soulignent que les trajectoires individuelles des firmes peuvent diverger à leur tour. Par exemple, si tous les constructeurs automobiles s'impliquent dans la modularité, les stratégies organisationnelles diffèrent, notamment entre constructeurs japonais et occidentaux (Takeishi, Fujimoto, 2001), ainsi que la manière de penser la décomposition technique du véhicule (Gadde, Jellbo, 2002). Cette double hétérogénéité nuance et paradoxalement renforce notre analyse. D'un côté, elle limite la portée de notre étude fondée sur une démarche en termes de faits stylisés ; de l'autre, elle vient appuyer notre démonstration car elle souligne que l'organisation possède sa part d'autonomie vis-à-vis du fait technologique. Que l'on raisonne sur une industrie ou sur une firme particulière, ce qui compte c'est la mise en cohérence en un instant donné du temps d'un couple technologie/organisation. L'évolution des deux dimensions ne pouvant se faire qu'au fil des apprentissages technologiques et organisationnelles, même si, ainsi que nous l'avons vu, c'est plutôt une dimension (technologique dans l'aéronautique, organisationnelle dans l'automobile) qui s'avère le moteur, probablement provisoire, de l'évolution du couple.

émergent voire se renforcent. Que l'on pense notamment au transfert de risque croissant supporté par les équipementiers

BIBLIOGRAPHIE

- AECMA (2002), *Strategy paper for Regional Associations*, The European Association of Aerospace Industries, may 2002, Multig., 23 p.
- AMESSE F., DRAGOSTE L., NOLLET J., PONCE S. (2001), "Issues on partnering: evidences from subcontracting in aeronautics", *Technovation*, Vol. 21, 559-569.
- BALDWIN C., CLARK K. (2000), *Design Rules: The Power of Modularity*, MIT Press, Cambridge (Mass.).
- BELUSSI F., ARCANGELI F. (1998), "A typology of networks: flexible and evolutionary firms", *Research Policy*, Vol. 27, n° 4, 415-428.
- BONACCORSI A., GIURI P. (2001), "The long-term evolution of vertically-related industries", *International Journal of Industrial Organization*, Vol. 19, n° 7, 1053-1083.
- BOYER R., CHARRON E., JÜRGENS U., TOLLIDAY S. (1998), *Between Imitation and Innovation. The Transfer and Hybridization of Productive Models in the International Automobile Industry*, Oxford University Press, Oxford.
- BRUSONI S., PRENCIPE A. (2001), "Unpacking the Black Box of Modularity: Technologies, Products and Organizations", *Industrial and Corporate Change*, Vol. 10, n° 1, 179-204.
- BRUSONI S., PRENCIPE A., PAVITT K. (2001), "Knowledge Specialisation, Organizational Coupling, and the Boundaries of the Firm: Why Do Firms Know More Than They Make?", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 46, n° 4, 597-621.
- CHANARON J-J., LUNG Y. (1995), *Économie de l'automobile*, Repères, La Découverte, Paris.
- CLARK K., FUJIMOTO T. (1991), *Product development performance: strategy, organization and management in the world auto industry*, Harvard Business School Press, Boston.
- CORIAT B. (1997), "Globalization, variety, and mass production: the metamorphosis of new competitive age", in Hollingsworth R., Boyer R. (eds.), *Contemporary Capitalism: The Embeddedness of Institutions*, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 240-264.
- ERENS F., VERHULST K. (1997), "Architectures for product families", *Computers in Industry*, Vol. 33, 165-178.
- FRENKEN K. (2000), "A complexity approach to innovation networks. The case of the aircraft industry (1909-1997)", *Research Policy*, Vol. 29, n 2, 257-272.
- FRIGANT V., LUNG Y. (2001), "Modular production and concentration in the supplier industry", *Paper presented at workshop of the CoCKEAS thematic network*, Universita Ca'Foscari di Venezia, Fondation Levi, Venice, 4-5 october.
- FRIGANT V., LUNG Y. (2002), "Geographical Proximity and Supplying Relationships in Modular Production", *International Journal of Urban and Regional Research*, Vol. 26, n° 4, 742-755.
- GADDE L-E., JELLBO O. (2002), "System sourcing—opportunities and problems", *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 8, 43-51.
- GALVIN P., MORKEL A. (2001), "The Effect of Product Modularity on Industry Structure: The Case of the World Bicycle Industry", *Industry and Innovation*, Vol. 8, n° 1, 31-47.
- GERPISA (2002), "Relations verticales et modularisation de la production automobile", *Actes du GERPISA*, n° 33, C.C.F.A., Mars.
- HATCHUEL A., LE MASSON P., WEIL B. (2002), "From knowledge management to design-oriented organizations", *International Social Science Journal*, Vol. 171, 25-37.
- HAAS J., LARRE F., OURTAU M. (2001), "R&D dans le secteur aéronautique et spatial : tensions liées à un contexte nouveau", *Les notes du LIRHE*, n° 348, Novembre.
- HENDERSON R., CLARK K. (1990), "Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms", *Administrative Science Quarterly*, Vol. 35, n° 1, 9-30.

- JALABERT G. (1974), *Les industries aéronautiques et spatiales en France*, Privat, Toulouse.
- JULLIEN B. (2002), "Consumer vs. manufacturer or consumer vs. consumer? The implication of a usage analysis of automobile systems", *Competition and Change*, Vol. 6, n° 1, 113-125.
- KECHIDI M. (1996), "Coordination inter-entreprises et relations de sous-traitance: le cas d'Aérospatiale", *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*, n° 1, 99-120.
- LAIGLE L. (1996), *La coopération inter-firmes. Approches théoriques et application au cas des relations constructeurs-fournisseurs dans l'industrie automobile*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Paris 13-Villetaneuse, 19 décembre, Multig.
- LANGLOIS R.N. (2002), "Modularity in technology and organization", *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 1, n° 1, 19-37.
- LANGLOIS R.N. (2003), "The Vanishing Hand: the Changing Dynamics of the Industrial Capitalism", *Industrial and Corporate Change*, Vol. 12, n° 2, 651-385, (Forthcoming).
- LANGLOIS R.N., ROBERTSON P.L. (1992), "Networks and Innovation in a Modular System: Lessons from the Microcomputer and Stereo Component Industries", *Research Policy*, Vol. 21, n° 4, 297-313.
- LARRE F. (1994), *Mécanismes et formes de coordination interentreprises, l'analyse d'un réseau de sous-traitance*, Thèse de doctorat, Université des Sciences Sociales de Toulouse, Mars, Multig.
- LECLER Y. (1993), *La référence japonaise*, L'Interdisciplinaire, Limonest.
- LUNG Y. (2001), "Coordinating competencies and knowledge: a critical issue for regional automotive systems", *International Journal of Automotive Technology and Management* Vol. 1, n° 1, 108-27.
- LUNG Y., VOLPATO G. (2002), "Redesigning the automakers-suppliers relationships in the automotive industry", *International Journal of Automotive Technology and Management*, Vol. 2, n° 1, 3-9.
- MCALINDEN S.P., SMITH B.C., SWIECKI B.F. (1999), "The Future of Modular Automotive Systems: Where are the Economic Efficiencies in the Modular Assembly Systems", *Michigan Automotive Partnership. Research Memorandum*, n°1. OSAT, University of Michigan, Transport Research Institute.
- MOATI P. (2001), "Organiser les marchés dans une économie fondée sur la connaissance: le rôle clé des « intégrateurs »", *Revue d'économie industrielle*, n°97, 123-138.
- RICHARDSON G.B. (1972), "The organisation of industry", *Economic Journal*, Vol. 82, n° 327, 883-896.
- SAKO M. (2002), "Modularity and Outsourcing: The Nature of Co-evolution of Product Architecture and Organisation Architecture in the Global Automotive Industry", in Prencipe A., Davies A. and Hobday M. (eds.), *The Business of Systems Integration*, Oxford University Press, Forthcoming
- SALVADOR F., FORZA C., RUNGTUSANATHAM M. (2002), "Modularity, product variety, production volume and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions", *Journal of Operations Management*, Vol. 20, n° 5, 549-575.
- SANCHEZ R. (2000), "Modular architectures, knowledge assets and organizational learning: new management processes for product creation", *International Journal Technology Management*, Vol. 19, n° 6, 610-629.
- SANCHEZ R., MAHONEY J.T. (1996), "Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design", *Strategic Management Journal*, Vol. 147, 63-76.
- SCHAEFER S. (1999), "Product design partition with complementary components", *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 38, 311-30.
- SEGRESTIN B., LEFEBVRE P., WEIL B. (2002), "The role of design regimes in the coordination of competencies and the conditions for inter-firm cooperation", *International Journal of Automotive Technology and Management*, Vol. 2, n° 1, 63-83.
- SIMON H. (1962), "The architecture of Complexity", *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 106, n° 6, 467-482.
- STURGEON T. (2002), "Modular production networks: a new American model of industrial organization", *Industrial and Corporate Change*, Vol. 11, n° 3, 451-496.

- SUSSMAN S.W., GUINAN P.J. (1999), "Antidotes for high complexity and ambiguity in software development", *Information and Management*, Vol. 36, n° 1, 23-35.
- TAKEISHI A., FUJIMOTO T. (2001), "Modularisation in the auto industry: interlinked multiple hierarchies of product, production and supplier systems", *International Journal of Automotive Technology and Management*, Vol. 1, n° 4, 379-396.
- TALBOT D., 1998, *Les principes institutionnalistes des dynamiques industrielle et spatiale : le cas du groupe Aérospatiale*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université des Sciences Sociales de Toulouse, 15 décembre, Multig.
- ULRICH K. (1995), "The role of product architecture in the manufacturing firm", *Research Policy*, Vol. 24, 419-440.
- VELOSO F., FIXSON S. (2001), "Make-Buy Decision in the Auto Industry: New Perspectives on the Role of the Supplier as an Innovator", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 67, 239-257.