HAL
open science

L'intégration des systèmes

Colette Depeyre, Hervé Dumez

To cite this version:

Colette Depeyre, Hervé Dumez. L'intégration des systèmes. Le Libellio d'AEGIS, 2006, 3, pp.14-18. hal-00263076

HAL Id: hal-00263076

https://hal.science/hal-00263076v1

Submitted on 2 Jun 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AEGIS le Libellio d'

TIRÉ A PART

Depeyre C. & H. Dumez, 2006, "L'intégration de systèmes", *Le Libellio* d'Aegis, n° 3, juin, pp. 14-18

Sommaire

1
De l'échec des bonnes intentions étatiques
B. Kogut

3
Les incitations de Moscovici : à propos de La Psychanalyse
E. Vaast

10
Influences : "Un hommage à Gerardine DeSanctis"
A-L. Fayard

14
L'intégration de systèmes
C. Depeyre & H. Dumez

19
Notes de séminaires
H. Dumez

Les autres articles de ce numéro & des numéros antérieurs sont téléchargeables à l'adresse :

http://crg.polytechnique.fr/v2/aegis.html#libellio

L'intégration de systèmes

à propos de Prencipe Andrea, Davies Andrew & Hobday Michael (2003) The Business of Systems Integration. Oxford, Oxford University Press.

La présentation de ce livre est l'occasion de rendre hommage à Keith Pavitt, décédé le 20 décembre 2002. Keith était intervenu dans le séminaire Condor en 2000 et son article a été publié dans le livre Management de l'innovation, management de la connaissance. Paris, l'Harmattan/FROG. Son intelligence et sa gentillesse ont laissé un grand vide.

De plus en plus de produits sont technologiquement complexes (Complex product systems – CoPS). Ils requièrent une immobilisation en capital élevée, des compétences en ingénierie pointues, et une forte dose de technologies de l'information. Ils font intervenir de multiples technologies, incorporées dans de nombreux composants, et impliquent de facto un nombre élevé de firmes pour les produire. Quelquefois, ils sont conçus pour les besoins d'un client sophistiqué, auquel ils sont livrés en une fois, ou en petites séries. Si une firme ne peut pas à elle seule maîtriser la conception, le développement et la fabrication de ces CoPS, elle doit par contre concevoir et intégrer le système : elle assume alors la fonction d'intégration de systèmes (*systems integration)*, en tant qu'intégrateur de systèmes ou systémier *(systems integrator)*.

L'intégration de systèmes et l'intégrateur de systèmes

Il y a une conception un peu naïve de l'intégration de systèmes : celle-ci se réduirait à définir l'architecture d'un système, à spécifier des interfaces, à sous-traiter la fabrication (éventuellement la conception et la fabrication) des composants ou modules, puis à assembler le tout une fois les composants fabriqués. La réalité est plus compliquée (Chapitre de Keith Pavitt). En 1990, l'Office of Science and Technology a défini ainsi l'intégration de systèmes : « La capacité à comprendre et modéliser les spécifications requises (requirements) d'un système majeur, ainsi que les interactions et la performance de ses nombreuses parties interdépendantes, d'une manière qui lève toute ambiguïté, rendant compatibles entre elles les différentes technologies des composants ; ensuite, la capacité à concevoir l'ensemble des systèmes, en même temps que les processus de fabrication et les unités de production. »

De cette définition découlent trois rôles pour le systémier.

En amont, le premier rôle consiste à monopoliser la relation avec le client (l'expression anglaise est *prime*) en étant son seul interlocuteur et en définissant les spécifications du système en liaison avec lui. La discussion avec le client dans les phases qui précèdent les appels d'offre est ici essentielle. La concurrence frontale se joue ensuite, lors de ces procédures, le client cherchant à maintenir une concurrence possible entre systémiers entre deux appels d'offres.

En interne, le systémier doit avoir la capacité de définir l'architecture du système (ses capacités de simulation sont ici centrales), d'organiser la fourniture des éléments composant le système, puis d'organiser l'intégration proprement dite de ces composants (la capacité de programmation et d'organisation des tests est alors cruciale). L'élimination des interférences négatives entre éléments d'un système étant une des dimensions centrales de l'organisation des tests.

En aval, le systémier doit avoir la capacité de mener le projet avec les sous-traitants qu'il a retenus, et les sous-traitants de ses sous-traitants. La capacité de repérer les risques de défaillance dans une chaîne verticale complexe constitue ainsi le troisième volet des compétences du systémier.

Les compétences internes de l'intégration de systèmes

Il est difficile de définir avec précision les compétences internes nécessaires à l'intégration des systèmes, mais elles tournent autour de quelques points : une base scientifique large, une capacité de modélisation, une capacité de test et une capacité à maîtriser les interfaces.

La fonction d'intégration de systèmes suppose des compétences élargies, des connaissances scientifiques et techniques sur l'ensemble des systèmes. General Motors achète ses pare-brise et ses plastiques mais a conservé des compétences dans le verre et le plastique. Comme le note Prencipe à partir de l'analyse du cas de l'industrie des réacteurs, la compétence du systémier n'est pas tant l'assemblage de composants que l'assemblage de compétences scientifiques et techniques. Ceci explique que les firmes qui cherchent à se spécialiser dans l'intégration de systèmes maintiennent en leur sein des capacités scientifiques très larges. La division du travail ne coïncide pas avec la division de la connaissance, moins évidente pour l'intégrateur (Giovanni Dosi).

L'intégration de systèmes repose aussi sur la capacité à modéliser des ensembles complexes, et à modéliser notamment les interactions potentielles entre des sous-systèmes (par exemple, au niveau de la mécanique, les effets de résonance ou de vibration ou, au niveau des systèmes de télécoms, les interférences possibles). En général, l'intégrateur de systèmes dispose à cet effet de fortes capacités de simulation, et maîtrise les technologies informatiques et de communication. Ce sont elles qui ont permis[1] : a) une réduction substantielle des coûts de recherche de composants standardisés et de sous-systèmes dont l'architecture est fixée ; b) de standardiser les matériels via la standardisation des logiciels ; c) de faire baisser les coûts de simulation, donc de développer le *learning before doing*[2] ; d) d'améliorer les discussions entre le donneur d'ordres et les fournisseurs en permettant de lever les ambiguïtés et e) en permettant à l'intégrateur de systèmes de mieux suivre l'état de développement des sous-systèmes chez ses fournisseurs.

Comme précisé plus haut, une autre compétence centrale de l'intégration de systèmes réside dans la capacité de concevoir et d'organiser les programmes de tests. Dans le domaine militaire, beaucoup d'experts estiment même que c'est au niveau des tests de performance et d'interopérabilité que se joue l'intégration de systèmes (ce qui n'est pas l'avis de Eugene Gholz dans le chapitre qu'il consacre au domaine militaire). Des organismes sont spécialisés dans cette tâche, à l'image du MITRE, un organisme semi-public ne faisant pas de profit et travaillant pour le gouvernement fédéral.

Enfin, la stratégie de définition des interfaces est délicate et peut être appréhendée de plusieurs manières (chapitre de Edward Steinmueller). Lors de la conception, on peut

définir des composants étroitement couplés (ils ont un impact important sur le fonctionnement des autres éléments et du système dans son ensemble), ou faiblement couplés (l'électronique de contrôle, par exemple, que l'on peut changer facilement sans que le système en soit directement affecté). Au niveau des interfaces, on peut choisir de standardiser ou non. L'absence de standardisation rend l'intégrateur de systèmes dépendant de ses fournisseurs. La standardisation permet quant à elle de les mettre en concurrence, mais elle présente le risque de faciliter l'entrée de concurrents au niveau même de l'intégration de systèmes. La standardisation des interfaces conduit à la modularisation.

La modularisation

La question de la modularisation est complexe et doit tout d'abord s'analyser en dynamique (chapitre de Henry Chesbrough). Au début d'une nouvelle technologie, les comportements des composants ne sont pas stabilisés et restent mal connus. L'intégrateur de systèmes garde en interne la conception et l'assemblage des sous-systèmes. Dans une phase ultérieure, la firme peut standardiser l'interface en gardant en interne la conception et l'assemblage d'un sous-système critique. Par la suite, si ce sous-système semble devenu moins critique, la firme peut chercher à être moins dépendante des solutions développées en interne et publier des standards pour ses interfaces en suscitant l'apparition de sous-traitants efficients en coûts. Mais tout standard fige le développement technologique. Tout composant devient, tôt ou tard, un goulot d'étranglement technologique. L'innovation se trouve alors entravée par un phénomène de piège de modularité (*modularity trap*). Il faut recommencer un nouveau cycle technologique, avec une nouvelle architecture système, dont les interfaces seront dans un premier temps, à nouveau, peu standardisées.

Le chapitre de Mari Sako illustre le fait que la question de la modularité pose celle de la définition de hiérarchies (de fonctions, de composants, d'organisations), et que celles-ci évoluent selon le cycle de vie du produit. La modularité en conception, en développement, en fabrication, et la modularité pour le client n'ont pas la même signification. Une autre question intervient : l'articulation entre les stratégies de modularité et les stratégies et inerties organisationnelles des firmes. L'organisation de la firme telle qu'elle est à l'instant t pèse sur les choix effectués en matière de stratégie de modularisation. Réciproquement, les stratégies de modularisation ont un impact sur les choix organisationnels. Il peut y avoir correspondance entre modularisation produit et modularisation organisationnelle (une sous-partie de l'organisation est autonomisée à partir d'interfaces standardisées), mais cette correspondance est loin d'être automatique et générale. L'article de Takeishi et Fujimoto revient sur cette notion de hiérarchie, et de hiérarchies multiples : la hiérarchie qui gouverne la modularité au niveau du produit n'est pas celle qui régit les relations hiérarchiques au niveau de la production et celles qui interviennent entre les firmes. Cet entrecroisement compliqué de hiérarchies diverses explique les stratégies de modularisation divergentes que l'on constate entre constructeurs automobiles américains, européens et japonais. Les Japonais ont par exemple modularisé leur production dans un souci surtout d'enrichir les tâches de leurs ouvriers et de faire remonter les tests en amont de la phase d'assemblage, mais ils n'ont pas externalisé la production de modules qu'ils ont maintenue en interne (la modularité produit ne s'est pas accompagnée d'une modularisation organisationnelle).

La dynamique de l'intégration de systèmes

Le problème de la modularisation, on vient de le voir, renvoie au problème central de la dynamique de l'intégration de systèmes. Andrea Prencipe avance la distinction entre synchronie et diachronie. La synchronie fait référence à la capacité qu'ont les firmes de concevoir, de décomposer des tâches en sous-systèmes, d'orchestrer le travail des fournisseurs, puis de recomposer le système dans son ensemble. Il s'agit de la capacité de développer un nouveau système. La diachronie consiste à être capable, à partir de l'analyse des besoins du client, d'introduire des changements incrémentaux dans une architecture définie pour proposer une gamme de produits ou des changements radicaux par une refonte de l'architecture. Il s'agit d'être capable de coordonner les changements qui interviennent au niveau de différentes technologies et de gérer les frontières organisationnelles. La distinction est importante au niveau conceptuel, mais les deux capacités s'entremêlent en pratique. L'articulation est complexe. Les stratégies d'intégration de systèmes donnent l'impression de procéder du haut vers le bas, ou d'un centre – l'intégrateur – vers la périphérie. En réalité, il faut être capable d'utiliser au mieux les avancées technologiques au niveau des composants pour reconcevoir les architectures (« *retrofitting* »), il faut être capable de ne pas se laisser enfermer par certains choix au niveau des composants (« *modularity trap* ») et être capable d'explorer de nouvelles solutions architecturales viables malgré les incertitudes technologiques qu'elles comportent au départ.

Les solutions intégrées

Dans un certain nombre de domaines, l'intégration de systèmes semble culminer dans une intégration produits/services qui consiste à fournir le produit sous forme de service (Chapitre de Andrew Davies). C'est en partie le cas dans le secteur militaire. Thales ne vend plus ses simulateurs de vols à la Royal Air Force, mais vend des heures de simulation pour les pilotes. EADS ne vend plus des avions ravitailleurs en vol mais de la disponibilité de ravitailleurs. Les Partenariats Public/Privé se sont ainsi développés entre clients publics et intégrateurs de systèmes privés. Et le même phénomène se rencontre entre clients privés : General Electric ne vend pas des réacteurs, mais un service incluant des modalités de paiement (GE Capital), de la maintenance, la fourniture de pièces de rechange, la remise à niveau des produits vendus durant de longues périodes. Cette évolution semble naturelle dans des secteurs où les coûts de développement sont considérables, pour un système risqué, vendu en une seule fois ou presque. La firme intégrant le système s'assure un revenu permanent sur longue période alors que son client n'a pas à assurer une dépense considérable en capital en une fois. La tendance vers la fourniture intégrée de produits et de services est à la fois relativement générale (elle commence à toucher beaucoup de secteurs) et naturelle (les grands systèmes demandent à être maintenus et les intégrateurs vendent à la fois le système et sa maintenance). Pour autant, il n'est pas évident qu'elle représente le modèle inévitable vers lequel évoluerait l'intégration de systèmes.

Le militaire

Il n'est pas sûr que, du point de vue qui était celui du livre, le secteur automobile soit le plus caractéristique des CoPS. Si l'on se reporte à la définition donnée plus haut, il présente même des caractéristiques qui l'éloignent assez nettement de l'idéal-type. Le militaire correspond mieux à ce dernier, tout en représentant sans doute un cas extrême (et donc peut-être intéressant à étudier). C'est dans le militaire que la question de l'intégration des systèmes s'est d'ailleurs posée à l'origine. Harvey Sapolsky est

connu pour avoir analysé le développement du système des missiles Polaris installé sur les sous-marins américains. Il revient dans le livre sur la naissance de l'intégration de systèmes au moment de la guerre froide. Eugene Gholz présente quant à lui une analyse actuelle du problème dans le militaire. Plusieurs questions apparaissent.

On voit, à travers ce cas extrême du militaire, que l'intégration de systèmes est une notion à la fois hiérarchique et dynamique. On repère dans ce secteur une hiérarchie à trois niveaux : (1) l'intégration des systèmes d'armes (un missile) et (2) l'intégration de plates-formes (pour former un ensemble répondant à une mission – la salle de commande au sol, l'avion et son missile, les satellites de communication permettant de programmer la mission et d'établir les communications entre les divers éléments de la plate-forme), dans lesquels des maîtres d'œuvre se spécialisent, et (3) l'intégration de systèmes (architecture de systèmes, système de systèmes) en réponse directe aux objectifs des armées. Traditionnellement, le dernier niveau hiérarchique était assuré par les états-majors des armées. Mais la dynamique des technologies, notamment de communication, tend à bouleverser les choses : ce niveau hiérarchique requiert une analyse des besoins, une traduction de ces besoins en spécifications (« *requirements* »), des capacités de simulation et de test, de définition des interfaces ; les armées, contraintes par la stagnation des budgets, n'en ont pas les moyens. Eugene Gholz analyse la bataille organisationnelle qui se joue autour de cette nouvelle forme d'intégration de systèmes, au sommet de la hiérarchie. Le concept américain est celui de *Network-Centric Warfare* (NCW). Il s'agit d'être capable en temps réel de coordonner des réseaux impliquant des fantassins, des chars, des avions, des missiles, des hélicoptères, des navires, tous les systèmes d'armes disponibles en recueillant l'information, en l'analysant de manière à donner les ordres optimaux à chaque échelon de commandement. Les armées apparaissent incapables d'assumer seules la fonction d'intégration. Dans le paysage existent des laboratoires propres aux armées (par exemple le SPAWAR Systems Center de San Diego), des organismes semi-publics techniques (les Federally Funded R&D Centers – FFRDC – Aerospace Corporation pour les systèmes spatiaux, MITRE pour la défense aérienne, APL pour les systèmes navals), des firmes marchandes non productrices de systèmes d'armes ou de plates-formes (comme SYNTEK), et les firmes d'armement, intégrateurs traditionnels de plates-formes et de systèmes d'armes (Boeing, Lockheed Martin, Raytheon). Chacune de ces organisations possède des atouts, une compétence dans une des dimensions de l'intégration de systèmes (commande et contrôle pour le MITRE par exemple, management de projet pour les firmes réalisant l'intégration des systèmes d'armes), mais aucune ne s'impose actuellement naturellement pour cette tâche nouvelle qu'est la capacité d'intégrer des systèmes de systèmes. La bataille stratégique est donc engagée pour savoir qui finira (dynamique) par occuper le sommet hiérarchique de l'intégration de systèmes (hiérarchie) dans le militaire. L'article de Eugene Gholz soulève deux problèmes centraux qui guident ce jeu stratégique : celui de la compétence et celui de l'indépendance (dont le symétrique est la capture).

Problèmes ouverts

Le cas – extrême – du militaire illustre en effet deux problèmes centraux qui restent ouverts après lecture du livre.

Le premier est celui de la compétence. Une chose est d'affirmer, comme le font à peu près tous les auteurs, que la nature de l'intégration de systèmes suppose par définition un non recouvrement entre division du travail et division de la connaissance. Un intégrateur de systèmes confie une grande part du travail de conception et de réalisa-

tion à des fournisseurs (division du travail) mais doit conserver des compétences sur les tâches réalisées par ces fournisseurs pour être capable de bien spécifier, concevoir, et finalement intégrer le système dans son ensemble. Mais comment conserver des compétences dans des domaines où l'on ne fait plus ? Les connaissances de type scientifique (connaissances explicites) suffisent-elles sans la dimension de la connaissance tacite qui provient du faire ? Les auteurs abordent peu cette question.

Le second est celui de la dépendance. Un de ses volets est simple à analyser : les fournisseurs dépendent de la manière dont le systémier a défini l'ensemble du système avec les interfaces. Mais la réciproque est également vraie : pour concevoir le système et l'intégrer, le systémier dépend de ce que savent et peuvent faire les fournisseurs.

Par ailleurs, les deux problèmes – compétence et indépendance – sont bien évidemment interdépendants. Les auteurs le montrent quand ils parlent du piège de la modularité (« *modularity trap* ») : en spécifiant les interfaces, le systémier fige la situation, les fournisseurs se spécialisent dans la fourniture de certains modules. Et le systémier (qui dépend des solutions élaborées par les fournisseurs), et les fournisseurs eux-mêmes (qui ont choisi leurs solutions à partir des interfaces du système) deviennent dépendants de l'existant et peuvent perdre la capacité d'élaborer des solutions nouvelles, puisque les compétences et connaissances des alternatives possibles se perdent. Dès lors, dira-t-on, il est important que le systémier conserve lui-même une activité de fourniture d'équipements – maîtrisant alors en interne les connaissances à ce niveau, il sera mieux à même de perfectionner le système dans son ensemble. En réalité, le problème de dépendance se déplace alors : le systémier, au lieu de dépendre de ses fournisseurs (dépendance externe) dépend des solutions élaborées dans ses propres filiales (dépendance interne) et cette situation peut constituer un piège encore plus redoutable (le systémier se trouvant contraint d'utiliser les solutions élaborées en interne pour ne pas se trouver financièrement pénalisé par le fait de sous-traiter à des fournisseurs plus efficients, mettant en péril l'équilibre de sa filiale).

Il semble donc qu'il y ait dans les stratégies d'intégration de systèmes un arbitrage toujours difficile à opérer entre la recherche d'indépendance (suppression des liens verticaux et mise en concurrence des équipementiers) et la recherche de compétence (liens verticaux étroits et co-innovation avec les équipementiers). Le livre suggère l'existence de cet arbitrage, mais sans le traiter ■

Colette Depeyre & Hervé Dumez
PREG — CNRS / École Polytechnique

1. Sturgeon, T. (2002) "Modular Production Networks. A New American Model of Industrial Organization," Industrial and Corporate Change, vol. 11, n° 3, pp. 451-496.
2. Pisano Gary P. (1997) The Development Factory. Cambridge MA, Harvard University Press.

Secrétariat de rédaction et mise en forme : Michèle Breton