

L'arbitrage modularité - intégration au sein des grands projets de haute technologie

Christophe Belleval
BETA (CNRS UMR 7522), Strasbourg
MCF - Université Paris 5 Descartes

Correspondance : 36, avenue Maurice Berteaux
95240 Cormeilles en Parisis

Résumé

Les grands projets de haute technologie (GPHT) ont pour objet la conception de produits et systèmes complexes (PSC), objets quasi-unique à l'architecture ad-hoc, ne bénéficiant que peu ou pas d'effets de série, faisant un usage intensif de technologie, et mobilisant des budgets importants. Le but de cet article est de discuter la pertinence des approches de modularisation (système, organisation et savoir) au regard de la problématique de la performance de tels projets. Nous nous appuyons sur une étude de cas qui porte sur une tentative, finalement abandonnée, de mise en œuvre d'une ligne de produits modulaire pour le programme de microsatellites Myriade du CNES. Nous comparons les approches intégrées et modulaires dans le cadre spécifique des GPHT, où les avantages a priori séduisants de cette dernière méritent d'être discutés et contextualisés. L'approche intégrée est adaptée à la résolution de problèmes caractérisés par une forte incertitude, alors que l'approche modulaire nécessite au minimum de connaître l'architecture et les modules du système envisagé. Les PSC radicalement innovants qui, par exemple, peuvent servir de support à de l'expérimentation scientifique (comme c'est le cas des systèmes Myriade), nécessitent au moins dans les phases amont une approche intégrée. Il est possible d'évoluer progressivement vers une approche modulaire, avec une organisation décentralisée et des processus parallèles, dès lors que sont réalisés les investissements initiaux dans la connaissance du système et dans le langage de travail entre communautés de pratique.

Mots clés : conception, management de projet, modularité, systèmes complexes.

L'arbitrage modularité - intégration au sein des grands projets de haute technologie

Résumé

Les grands projets de haute technologie (GPHT) ont pour objet la conception de produits et systèmes complexes (PSC), objets quasi-unique à l'architecture ad-hoc, ne bénéficiant que peu ou pas d'effets de série, faisant un usage intensif de technologie, et mobilisant des budgets importants. Le but de cet article est de discuter la pertinence des approches de modularisation (système, organisation et savoir) au regard de la problématique de la performance de tels projets. Nous nous appuyons sur une étude de cas qui porte sur une tentative, finalement abandonnée, de mise en œuvre d'une ligne de produits modulaire pour le programme de microsatellites Myriade du CNES. Nous comparons les approches intégrées et modulaires dans le cadre spécifique des GPHT, où les avantages a priori séduisants de cette dernière méritent d'être discutés et contextualisés. L'approche intégrée est adaptée à la résolution de problèmes caractérisés par une forte incertitude, alors que l'approche modulaire nécessite au minimum de connaître l'architecture et les modules du système envisagé. Les PSC radicalement innovants qui, par exemple, peuvent servir de support à de l'expérimentation scientifique (comme c'est le cas des systèmes Myriade), nécessitent au moins dans les phases amont une approche intégrée. Il est possible d'évoluer progressivement vers une approche modulaire, avec une organisation décentralisée et des processus parallèles, dès lors que sont réalisés les investissements initiaux dans la connaissance du système et dans le langage de travail entre communautés de pratique.

1. INTRODUCTION

Les grands projets de haute technologie (GPHT) ont pour objet la conception de produits et systèmes complexes (PSC). Ceux-ci constituent une part significative des infrastructures civiles et militaires, de même que certaines réalisations d'origine privée en portent les caractéristiques. Celles-ci sont essentiellement de trois ordres: le montant élevé des investissements, le caractère de quasi-prototype de chaque système et l'usage intensif de technologie. On y trouve notamment des systèmes militaires, des infrastructures civiles de taille significative, des projets scientifiques, des logiciels, des réseaux de télécommunication ou encore des systèmes spatiaux (Hobday *et al.*, 2000).

Un certain nombre d'études portant sur de tels processus ont vu le jour à partir des années 1960, à propos de projets militaires tels que le missile Polaris (Sapolsky, 1972), Apollo, Concorde, centrales nucléaires (Morris, Hough, 1987 ; Johnson, 2002) pour ne citer que les plus connues. Bien que la mode des grands projets soit apparemment associée aux programmes d'après-guerre (Cohen, 1992), l'importance des PSC dans l'économie n'a pas diminué, bien au contraire (Hobday *et al.*, *Ibid.*). Compte tenu des montants élevés des sommes engagées, la question de la performance¹ de tels processus² de conception revêt aujourd'hui une importance toute particulière, d'une part dans un contexte de volonté politique de maîtriser les dépenses de l'Etat, d'autre part en raison des exigences sans cesse accrues de rentabilisation des capitaux investis sur des projets à financement privé. De plus, on note une complexité sans cesse accrue de tels systèmes ainsi qu'une accélération hétérogène des cycles technologiques qui rendent le pilotage de conception problématique (Brusoni *et al.*, 2001). Or, de nombreuses études ont souligné le non-respect systématique du cahier des charges de tels projets sur les trois composantes essentielles que sont le contenu, le budget et le calendrier de réalisation³. Partant de ce constat, il est curieux de constater que, durant la dernière décennie, peu d'études de cas ont été réalisées sur les GPHT qui portent sur la problématique de l'amélioration de la performance du processus de conception qui constitue leur raison d'être.

En tant que contribution à la question de la performance du processus de conception, et sur un plan plus général, certains auteurs tels que Baldwin et Clark (1997, 2000) ou Sanchez et Mahoney (1996) avancent l'hypothèse que la modularisation des systèmes et de l'organisation

projet représente une méthode efficace qui permet de maîtriser la complexité de l'objet à concevoir en la circonvenant à des sous-ensembles (sous-systèmes ou modules) tout en simplifiant l'architecture constituée de modules bien délimités ; il est ainsi possible de limiter les boucles de re-conception (Nightingale, 2000), comme l'explique Simon (1962) avec son célèbre paradoxe de Tempus et Hora. L'utilisation de modules standardisés permet de même de réaliser des économies d'échelle en autorisant leur réutilisation au sein de plusieurs systèmes. De tels concepts, jusqu'alors étudiés principalement sur des systèmes produits en grande série tels que l'électronique grand public (Clark, Wheelwright, 1992) présentent néanmoins des problèmes généraux liés à l'ambiguïté des concepts utilisés (Fernex-Walch, Triomphe, 2004) ; de plus, ils méritaient d'être testés dans le cadre très spécifique d'un GPHT. Nous avons voulu tester la faisabilité de certains types de modularisation appliquée aux PSC au travers de l'étude de cas du programme de microsattellites Myriade du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), dont l'un des objectifs initiaux était la mise en œuvre d'une ligne de produits constituée d'un tronc commun standard et d'options. La Direction des Systèmes Orbitaux de l'Agence estimait que cette ligne de produits était susceptible d'avoir un impact positif sur le programme Myriade : premièrement en accélérant les temps de conception des systèmes, deuxièmement en améliorant la maîtrise de leur complexité, donc du calendrier et du budget, tout en satisfaisant le « client », i.e. : la communauté scientifique. En d'autres termes, la ligne de produits était supposée devenir un facteur de performance, telle que nous l'avons définie ci-dessus. Pour comprendre cette tentative, nous faisons appel à trois concepts de modularité : celle relative aux systèmes, à l'organisation, et au savoir. Une architecture est modulaire lorsque des sous-ensembles indépendants peuvent être développés séparément et parallèlement, suite à la définition initiale de règles de conception et d'interfaces standardisées. (Baldwin, Clark, 2000, *Ibid.*). De manière homothétique, selon Sanchez et Mahoney (*Ibid.*), l'organisation qui met en œuvre ces modules crée un savoir qui lui permet de fonctionner en mode « décentralisé », donc modulaire. Les communautés de pratique qui apprennent à travailler entre elles au travers du projet mettent en œuvre ce que Langlois (2002) appelle la modularité du savoir. Notre article présente les résultats concernant le test de deux hypothèses : la première est que l'application à Myriade des trois types de modularité (système, organisation et savoir) au travers de la ligne de produits est un facteur de performance ; la seconde découlant de la généralisation de la première, est que l'application de ces trois types de modularité aux GPHT est de même susceptible d'améliorer leur performance. Nous verrons comment et pourquoi la première a été invalidée, et quelles sont les conditions théoriques qui permettraient de réaliser la seconde.

La direction du CNES nous a proposé de 1998 à 2002 d'intégrer l'équipe Myriade afin d'effectuer une recherche clinique, «interaction instituée entre le chercheur et son terrain d'étude» (Girin, 1981). Rattaché au Chef de Division Microsatellites (nous n'avons cependant pas été employé par le CNES, puisque chercheur au BETA⁴), nous avons participé durant cette période à la mise en place du programme Myriade à la fois en tant qu'observateur et acteur. Le travail de terrain s'est effectué au travers d'entretiens avec les membres de l'équipe du programme, des acteurs métiers, des fournisseurs, ainsi qu'avec la Direction de l'agence spatiale, tant au Centre Spatial de Toulouse qu'au siège à Paris. Nous avons eu accès à l'ensemble de la documentation disponible pour ce programme (y compris le cahier des charges et les revues d'étapes chiffrées pour la période concernée), et avons participé à un ensemble de réunions qui portaient sur les thèmes que nous abordons ici, qui mobilisaient aussi bien acteurs internes et externes au CNES. Nous avons élaboré le travail présenté dans cet article au travers d'une démarche abductive (Koenig, 1993) consistant en «allers-retours entre des observations et des connaissances théoriques tout au long de la recherche» (Charreire, Durieux, 1999). Les conclusions ont été validées d'une part sur le plan méthodologique et scientifique par les instances de contrôle du BETA (revues d'étape des travaux, présentations à des chercheurs spécialistes de ces questions appartenant ou non au laboratoire, validation finale), d'autre part par la Direction du CNES et par le responsable du programme Myriade durant cette période, qui ont estimé que ces travaux avaient eu un réel impact pratique. De plus, un travail ultérieur de relecture et de réinterprétation de ces données, qui est à l'origine de cette présentation, a été effectué en 2003 dans le cadre du Projet «Temps des produits, dynamiques des firmes et trajectoires des individus», contrat de recherche du Ministère de l'Industrie, dirigé par le CRG⁵ et auquel participait le BETA.

La présentation de cette étude s'effectuera de la manière suivante. Nous définissons en premier lieu le processus de conception de PSC qu'est le GPHT, puis expliquons en quoi les programmes spatiaux sont composés de portefeuilles de tels projets. Nous présentons le programme de microsatellites Myriade, au travers duquel le CNES tenta l'expérience d'une ligne de produits modulaire. Après avoir exposé les questions spécifiques à la modularité des systèmes spatiaux, nous exposons la tentative de mise en œuvre de cette ligne de produits, qui se solde finalement par un échec, que nous interprétons grâce aux trois concepts de modularité présentés ci-dessus. La discussion finale porte sur la comparaison entre approche modulaire et intégrée, qui mérite d'être revisitée dans le contexte spécifique des GPHT,

puisque les avocats de la première approche utilisent des arguments à sous-peser au regard notamment de l'unicité de chaque PSC.

1. LES CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES DES GRANDS PROJETS DE HAUTE TECHNOLOGIE

L'objet du grand projet de haute technologie (GPHT) est la réalisation d'un produit ou système complexe (PSC)⁶. Hobday *et al.* (*Ibid.*) le définissent comme un bien immobilisé quasi prototype, dont le coût de revient est élevé, faisant appel de manière intensive à de la technologie⁷. Il peut s'agir d'équipements, de systèmes, de réseaux, d'unités de contrôle, de logiciels, de progiciels ou de services. Ce type de production, sous-ensemble des immobilisations de haute technologie, constitue la colonne vertébrale technologique de l'économie moderne. Les propriétés des PSC les distinguent fondamentalement des biens d'équipement courants selon trois axes (Hobday *et al.*, *Ibid.*) :

- le nombre d'éléments ad - hoc interconnectés de manière hiérarchique, configurés pour un client ou un marché spécifique,
- les propriétés émergentes de l'objet lors de sa conception et de sa réalisation, en raison du nombre élevé d'événements imprévisibles générés par l'ingénierie et l'intégration, l'émergence continue de propriétés d'une génération de système à l'autre,
- l'implication directe du client dans le processus émergent, puisque, le fournisseur ne vend pas un produit, mais l'idée qu'il est capable de répondre aux attentes du client ; la formulation des objectifs du projet de conception constitue dans un tel contexte un enjeu capital, puisque le client est partie prenante du processus de conception. Ceci traduit le caractère téléologique des systèmes complexes (Le Moigne, 1999) : ils se structurent de par leur finalité.

L'importance des problèmes de conception et la complexité intrinsèque des PSC créent un ensemble très dense de tâches non routinières (Hobday, Rush, 1999) qui nécessitent une reconfiguration constante, et un processus de prise de décision dans un environnement incertain. Selon Nightingale (*Ibid.*), il existe six facteurs d'incertitude, susceptibles de se combiner entre eux lors de la mise en œuvre de PSC :

- les traditions technologiques établies,
- l'incertitude intrinsèque à la technologie,

- la complexité du produit,
- les relations systémiques entre sous-systèmes,
- les problèmes résolus ou non créateurs de propriétés émergentes,
- les rigidités organisationnelles.

2. LES PROGRAMMES SPATIAUX, PORTEFEUILLES DE GPHT

Les projets spatiaux que nous traitons ici relèvent des deux logiques suivantes, commerciale d'une part, de développement technologique et scientifique d'autre part⁸ : les maîtres d'œuvre industriels réalisent des systèmes à vocation commerciale (satellites de télécommunication ou de télédiffusion) dont les fonctionnalités sont récurrentes (transmission de données) ; les agences spatiales sont le bras armé de l'Etat pour le développement des technologies et des systèmes jugés critiques, et la réalisation d'expériences scientifiques embarquées : lanceurs, composants, sous-systèmes et systèmes spatiaux, savoir-faire. Les agences ne commercialisent pas de systèmes de télécommunications, mais participent activement à leur développement, en mobilisant compétences et moyens financiers. De ce fait, aucun maître d'œuvre n'assure à lui seul le développement d'un système à vocation commerciale : tout ou partie de ses constituants sont réalisés grâce à un apport de fonds publics ou un support d'expertise (en France via le CNES, en Europe par l'Agence Spatiale Européenne - ESA, aux Etats-Unis par la NASA ou le Département de la Défense – DoD). En dehors des lanceurs, les agences spatiales conçoivent des systèmes spatiaux scientifiques ou des démonstrateurs technologiques. Ces deux dernières catégories ont comme principale caractéristique la recherche de la performance technique: en particulier la communauté scientifique recherche toujours plus de précision et de sensibilité des capteurs embarqués, et toujours plus de données à traiter.

Les programmes des agences spatiales mobilisent un portefeuille de GPHT. Les motivations essentiellement politiques, les contraintes extrêmes liées à l'environnement spatial, l'impossibilité de maintenir un ensemble de systèmes très vulnérables en orbite, l'absence de marchés auto-financés, et le rôle central des agences spatiales dans le processus innovant s'ajoutent à la complexité inhérente de ce type de projets.

Nous nous intéressons ici aux programmes impliquant la mise à poste d'un satellite, voire au lancement d'une sonde interplanétaire (nous ne traitons pas de la problématique des lanceurs). Typiquement, un tel système est composé de l'engin placé dans le milieu spatial (satellite ou

sonde constitué d'une plate-forme et d'une charge utile), et du segment sol (télécommunications, maintenance, échanges et traitement de données). Alors que les systèmes à vocation commerciale bénéficient d'un petit effet de série sur la plate-forme et les équipements embarqués, les systèmes scientifiques ou les démonstrateurs technologiques requièrent des performances uniques et toujours poussées à la limite du réalisable dans l'enveloppe de contraintes : il n'y a donc presque aucun effet de série, chaque engin étant un quasi prototype. La conception et la réalisation de tels systèmes relève d'une forme technologiquement très poussée d'artisanat. En revanche, le segment sol est en général relativement similaire, et permet le développement d'infrastructures et de logiciels communs aux aspects télécommunications et maintenance des engins mis à poste (les logiciels relatifs au traitement des données de la charge utile sont eux développés sur mesure).

Du fait de la variété des types de mission, l'organisation des projets varie grandement. Les éléments critiques sont : le système dans son ensemble (si la mission est intégrée dans un ensemble plus vaste), le satellite et la charge utile. Chacun de ces niveaux requiert un choix en matière de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre. La maîtrise d'ouvrage système est le plus généralement sous la responsabilité de l'agence spatiale. La maîtrise d'ouvrage de la charge utile est gérée par le laboratoire scientifique qui en a la charge⁹ ; sa maîtrise d'œuvre dépend du savoir-faire du laboratoire en matière de technologie spatiale : seuls les gros laboratoires ont les moyens d'investir dans de telles compétences, l'agence s'impliquant fortement dans presque tous les cas. La maîtrise d'œuvre satellite relève de l'agence (si elle possède de telles compétences) ou d'un industriel du secteur¹⁰.

3. LE PROGRAMME DE MICROSATELLITES MYRIADE DU CNES

Le Programme Microsatellites « Myriade » du CNES, Agence Française de l'Espace, trouve son origine dans un ensemble pluridimensionnel de motivations : donner à la communauté scientifique un nouveau mode d'accès à l'espace circumterrestre, procurer un banc de tests pour de nouvelles technologies, expérimenter de nouvelles méthodes de pilotage et d'articulation projet – métiers, faire évoluer par l'action le positionnement du CNES à la fois dans la politique spatiale de la France et de l'Europe, et par rapport à l'industrie.

Myriade est constitué d'un portefeuille de projets développant chacun un système autour d'une charge utile. L'organisation telle que nous l'avons étudiée s'articulait entre moyens communs à la Division Microsatellites, une sous-structure et des moyens propres à la ligne de

produits, ainsi qu'une organisation projet pour chaque système à développer (un système = un satellite emportant une charge utile, ainsi que les moyens au sol).

Myriade possède toutes les caractéristiques d'un portefeuille de grands projets de haute technologie si ce n'est le budget investi relativement faible, et les temps de conception considérablement réduits par rapport aux programmes spatiaux « classiques ». La ligne de produits que nous décrivons ultérieurement dans cet article est complexe, possède des caractéristiques émergentes qui génèrent un haut niveau d'incertitude. La relation avec le client (issu essentiellement de la communauté scientifique) est directe, puisque ce dernier participe avec le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre à sa conception.. Chaque satellite, bien qu'utilisant certains éléments communs propres à la ligne de produits, est un système unique.

Avant de décrire la ligne de produits, il nous paraît utile d'expliquer la genèse de sa conception, autour du débat sur la modularisation des systèmes spatiaux. On notera que les motivations avancées pour la promouvoir sont identiques à celles invoquées par les avocats de cette approche dans d'autres secteurs (Baldwin, Clark, 2000 *Ibid.*).

4. LA QUESTION DE LA MODULARITE DES SYSTEMES SPATIAUX

Le secteur spatial, dans le but de diminuer les coûts et délais de conception, a mis en œuvre récemment deux types de stratégie de modularisation des systèmes, faisant appel à la standardisation de certains sous-systèmes, composants et interfaces : d'une part la plate-forme commune à un ensemble de charges utiles (ainsi en est-il des familles de satellites de télécommunications, tels que les séries SpaceBus d'Alcatel) ; d'autre part le concept de ligne de produits, sur lequel était initialement fondé Myriade, qui envisageait de pousser la modularité jusqu'aux modes de conception.

Dans une approche de type plate-forme standard, l'environnement autour de la charge utile est commun à tous les satellites ; cela signifie que cette charge utile doit s'adapter à la plate-forme et non l'inverse. En dehors de telles éventualités, l'intérêt d'un produit standard s'estompe, car le compromis n'est jamais optimum : soit la plate-forme est trop limitée et donc pas adaptée à la mission, soit surdimensionnée et donc trop lourde et trop coûteuse. La logique de la plate-forme standard s'adapte donc relativement bien aux séries de satellites commerciaux de télécommunications : les besoins sont récurrents et les équipements

standardisés. Les effets de série sont cependant relativement limités, même lorsque l'on prend en compte les tentatives infructueuses d'exploiter des constellations en orbite basse.

Dans le cas des missions scientifiques, l'utilisation des plates-formes communes est plus une contrainte qu'un atout. Chaque mission est unique tant du point de vue de la charge utile que des caractéristiques requises pour le bus. Une plate-forme commune crée donc un impératif coûteux d'adaptation de la charge utile (à moins que ce ne soit le contraire), sans apport réel d'économies d'échelle.

5. LA LIGNE DE PRODUITS MYRIADE : LA MISE EN ŒUVRE DE TROIS TYPES DE MODULARITE

La mise en œuvre d'une ligne de produits, telle que conçue dans le cadre de Myriade, prenait en compte le caractère de PSC que sont chacun des microsattellites : les expériences embarquées diffèrent totalement d'une mission à une autre, et donc les exigences en matière de performance du système. Une ligne de produits n'est pas une plate-forme commune : elle est non seulement un ensemble de méthodes, un savoir et un savoir-faire, qui permettent de réaliser une classe de missions, mais elle s'appuie aussi sur une base de composants et sous-systèmes préalablement testés et validés pour un environnement spatial. L'apparence physique des microsattellites peut varier sensiblement, bien que certains composants, sous-systèmes, interfaces et logiciels soient communs à l'ensemble des satellites. La création de chaînes fonctionnelles (système de contrôle d'attitude et d'orbite, alimentation électrique, calculateur et télécommunications) avait pour objet de permettre l'utilisation de matériels et de logiciels communs à l'ensemble des satellites (Bouzat, 2002).

La ligne de produits Myriade s'articulait autour de trois types de modularité, au-delà de la définition plus simple d'une plate-forme standard telle que nous l'avons vue précédemment : modularité des systèmes conçus, modularité organisationnelle, modularité du savoir.

5.1. MODULARITE DES SYSTEMES

La modularité d'un système se réfère à un mode d'interdépendance des composants au travers d'interfaces standardisées (Sanchez, 1995), i.e. : des relations fonctionnelles et spatiales entre composants, qui, une fois spécifiées, sont figées durant le processus de développement (Sanchez, Mahoney, *Ibid.*). Une architecture modulaire utilise des interfaces standard entre composant, de manière à créer une marge d'évolution des composants dans l'architecture. Les

composants modulaires rentrent dans les marges ainsi définies par l'architecture modulaire qui devient alors flexible (Sanchez, 1994 ; Ulrich, Eppinger, 1995 ; Sanchez, Mahoney, *Ibid.*).

La conception de la ligne de produits¹¹ Myriade s'appuyait sur un tronc standard¹² avec un nombre d'options offertes en fonction des besoins¹³, et dans la limite des contraintes définies dans le Dossier de Programme (CNES, 1998). Cela signifie que le responsable de charge utile devait intégrer dès la conception de celle-ci les limites de performance de la ligne de produits (par opposition au sur-mesure, où le support était totalement contraint par les objectifs de performance de la charge utile), et dans une optique de minimisation des coûts. La charge utile devait donc être conçue avec le satellite en ingénierie simultanée.

Une telle approche signifiait pour Myriade :

- la définition d'une classe de bus (masse et volume contraints par l'interface avec le lanceur) qui détermine un potentiel de performance de base, ainsi que des options (puissance embarquée répartie entre charge utile et bus, moyens de traitement et de stockage de l'information, capteurs, télécommunications, précision de pointage, propulsion),
- un budget pour la ligne de produits et pour chaque mission, ainsi qu'un arbitrage coût-performance (Belleval, 2002),
- une base de données d'équipements récurrents et optionnels, utilisables en particulier dans les chaînes fonctionnelles et les options,
- des méthodes communes de conception au travers d'un atelier d'ingénierie.

Selon la terminologie de Sanchez et Mahoney (*Ibid.*), nous distinguons dans le cadre du programme Myriade les niveaux de macro-système (ligne de produits), satellite (système), chaînes fonctionnelles et charge utile (sous-systèmes) ainsi que les composants non spatiaux testés et qualifiés pour la ligne de produits, puis référencés dans la base de données matériel et logiciels. Myriade générait plusieurs niveaux d'apprentissage de conception de produits:

- un apprentissage modulaire au niveau de composants non spatiaux (COTS)¹⁴ qui font l'objet d'un transfert de technologie, d'une adaptation aux besoins de la ligne de produits, et d'un référencement des performances (par exemple la durée de vie d'un composant électronique de type processeur ou mémoire de masse, une fois « durci » aux contraintes spatiales de radiation, variations de température et

vibrations) ; cet aspect est fondamental dans la mesure où la quasi-totalité de la recherche et développement en informatique, télécommunications et matériaux s'effectue aujourd'hui hors secteur spatial, et que l'on n'envisage plus la fabrication de composants ad hoc sauf en cas de complète indisponibilité et substituabilité,

- un apprentissage radical au niveau des composants et de l'architecture, puisque les contraintes liées à l'adaptation des COTS impliquent une adaptation de l'architecture système à la tolérance de panne, sans pour autant altérer significativement le devis de masse, lui-même très contraint,
- un apprentissage architectural motivé par les contraintes de performance toujours accrues des missions scientifiques ; cela se traduit par les nouvelles opportunités d'expérimentation scientifiques que d'anciennes plates-formes plus massives et coûteuses ne peuvent assurer¹⁵.

5.2. MODULARITE ORGANISATIONNELLE

Selon Sanchez et Mahoney (*Ibid.*), la création d'architectures et de programmes modulaires est susceptible de favoriser l'apprentissage organisationnel à la fois aux niveaux de l'architecture et des composants. Elle permettrait la mise en place d'organisations modulaires et flexibles autour de processus destinés à créer et appliquer du savoir produisant de la matière grise sous la forme de nouvelles conceptions et technologies. Pour ces auteurs, il existe un lien direct entre modularité du produit et modularité de l'organisation qui pilote le processus de conception.

Un tel lien n'apparaît pas de manière évidente dans le cas de Myriade, où plusieurs modes se succèdent ou se superposent durant le cycle de vie des projets. En premier lieu, le choix des missions par le Comité des Programmes Scientifiques (CPS) s'effectuait suivant une approche séquentielle. La conception de la ligne de produits, puis le pilotage de projet étaient constitués d'un ensemble de processus parallèles (plusieurs tâches étaient menées simultanément), et selon une organisation modulaire : chaque sous-système, dont les interfaces étaient en principe définies au préalable, était géré par une équipe distincte. En revanche, l'intégration du système s'effectuait en ingénierie simultanée, entre une équipe du CNES et le sous-traitant choisi à cet effet, du moins lors du transfert initial de technologie vers ce dernier¹⁶.

Nous analyserons ultérieurement l'impact de tels choix organisationnels sur la performance des projets Myriade. Dans son essence, le concept de ligne de produits tel que défini dans notre étude de cas fait largement appel à un autre concept, relativement peu évoqué dans la littérature de management de projet : la modularité du savoir.

5.3. MODULARITE DU SAVOIR

La ligne de produits, nous l'avons vu précédemment, était supposée constituer non seulement la colonne vertébrale d'une architecture système modulaire, mais aussi devenir une partie intégrante d'une organisation qui elle-même se voulait modulaire. Cependant, sa mise en œuvre ne peut selon nous que se comprendre de manière ultime qu'au travers du concept de modularité du savoir, i.e. : l'articulation des connaissances nécessaires à sa mise en œuvre. Selon Langlois (*Ibid.*), la question essentielle est la communication entre processus qui sont modulaires. La représentation des compétences mobilisées dans un tel contexte fait apparaître l'existence de modules s'articulant entre eux, dont certains correspondent à des sous-systèmes, d'autres à des sous-processus (cf. Figure 1). Cette modularité n'est elle même pas systématiquement homothétique de celles liées à l'architecture du système ou de l'organisation, mais toujours selon Langlois (*Ibid.*), les échanges entre modules de quelque nature qu'ils soient sont conditionnés par les échanges d'information. La modularité cognitive influence donc l'organisation des projets au sein du programme.

Figure 1 : Organisation des compétences nécessaires à conception et à la mise en œuvre de systèmes Myriade.

Maîtrise d'ouvrage

Compétences en management de projet
 Compétences de maîtrise d'œuvre système (lanceur, segment sol, satellite, sol - opérations)

Maîtrise d'œuvre système - satellite

Support ingénierie aux laboratoires (CU, CMS)

Structure d'accueil - centre de traitement / Programmation de la CU
 Applications technologies spatiales mission :
 → capteurs optoélectroniques
 → mécanismes
 → EMC
 → Traitement numérique rapide
 → Antennes & hyper - fréquences / télécoms
 Support ingénierie / expertise AMT
 Support AQ composants.

Conception satellite et approvisionnements nouveaux

Capacité de conception :
 → ingénierie satellite (AMT, architecture électrique, SCAO, système, RF)
 → AQ composants non spatiaux
 Capacité d'approvisionnement nouveaux équipements.

Intégration et tests

Capacité d'ingénierie intégration et tests

Assembler de chaînes fonctionnelles dans un environnement satellite

Capacité d'approvisionnement d'équipements récurrents
 Capacité d'intégration et d'essais

Abréviations

- CU : charge utile
- CMS : centre de mission scientifique
- EMC : compatibilité électromagnétique
- AMT : architecture mécanique et thermique
- SCAO : système de contrôle d'attitude et d'orbite
- RF : radiofréquences
- AQ : assurance qualité

6. LES DIFFICULTES DU PROGRAMME ET L'ABANDON PROGRESSIF DE LA LIGNE DE PRODUITS

A ce jour, le satellite prototype Demeter a été lancé en juin 2004, ainsi que Parasol en décembre de cette même année. Nous ne discuterons pas ici de l'impact de ces projets sur la communauté scientifique qui en bénéficie : il lui appartient d'en faire ultérieurement un bilan. Nous nous cantonnons aux questions liées au management de projet, ainsi qu'à l'impact sur le respect du budget et du calendrier initialement prévus. Ainsi, la réalisation de ces deux systèmes ne doit pas cacher les problèmes sérieux qu'a connus Myriade. Les coûts rapportés au budget du cahier des charges (CNES, *Ibid.*) ont été largement dépassés ; ce même document de référence prévoyait le lancement du prototype entre 2001 et 2002, ainsi que deux lancements de satellites par an. Ces paramètres sont, comme on le voit, loin d'être respectés. De plus, le concept de ligne de produits a été progressivement escamoté du discours officiel, pour être remplacé par celui de famille de satellites. En réalité, c'est le concept même qui a été abandonné.

Les difficultés de Myriade s'inscrivent dans le contexte général de la crise du secteur spatial que traversent non seulement les pays européens, mais aussi les Etats-Unis. Sans rentrer dans les détails, citons succinctement des questions de stagnation, voire de régression budgétaire, l'absence de programmes mobilisateurs, des structures et des méthodes dépassées (alors que ce secteur fut pionnier en matière d'innovation organisationnelle et méthodologique dans les années 1960 – Sapolsky, *Ibid.*, Johnson, *Ibid.*), des réflexes corporatistes où beaucoup refusent d'évoluer se croyant à l'abri des budgets gouvernementaux en justifiant du caractère stratégique du secteur. Durant notre étude de cas, lors de réunions où la Division Microsatellites recherchait le soutien des métiers du Centre Spatial de Toulouse, nous avons constaté des résistances particulièrement fortes aux innovations technologiques et méthodologiques proposées, voire même sur la question de l'organisation et du rôle du responsable de programme. Aux Etats-Unis, la NASA a rencontré des problèmes similaires lors de la mise en œuvre des programmes dits « Faster, Better, Cheaper » (McCurdy, 2001). Ce problème n'est donc pas spécifique au CNES ni à Myriade. Au-delà de ce contexte général que l'on ne peut négliger, il nous paraît important de comprendre les raisons intrinsèques à notre étude de cas, qui nous conduisent à des conclusions de portée praxéologique et théorique.

L'abandon de la ligne de produits est la conséquence de la difficulté pratique de mise en œuvre, au regard des ressources mobilisées, de l'organisation, et du concept même rapporté aux objectifs initiaux ambitieux en terme d'innovation. D'une part les satellites sont pour l'instant peu innovants (par exemple, il n'y a pas eu d'intégration de systèmes d'autonomie à bord des premiers satellites, alors qu'il s'agit d'une priorité clairement affirmée par des agences telles que la NASA – 1998) ; d'autre part les premiers systèmes en cours de conception sont relativement similaires et font appel essentiellement à la plate-forme prototype Demeter. Les difficultés de mise en œuvre, combinées aux baisses de son budget général ont poussé l'Agence Française de l'Espace vers des options minimalistes.

Analysons les questions liées à la ligne de produits au travers des trois concepts de modularité que nous avons mobilisés. En premier lieu, la modularité des systèmes à concevoir. La caractéristique des expériences scientifiques embarquées est leur extrême diversité : détecteurs d'ondes, analyseurs de composants atmosphériques, télescope, expérience de physique, pour n'en citer que quelques unes, requièrent une définition fort différente de chaque système porteur. Il est donc clair que l'investissement initial en termes de composants constitutifs de la ligne de produits devait s'avérer particulièrement onéreux, et notre analyse du budget du cahier des charges montre qu'il a été largement sous-estimé. Ce constat n'invalide pas le concept, mais démontre que l'investissement en termes de modularité est à peser eu égard aux montants proportionnellement élevés par rapport aux coûts unitaires des systèmes, et au faible effet de série s'il en existe vraiment un (ce qui reste à démontrer). Par ailleurs, on peut s'interroger sur les liens qui existent entre innovation et systèmes modulaires, dans le cas où l'on met en œuvre la conception de PSC comme c'est le cas pour les missions Myriade. En effet, la solution technologique au problème posé par une expérience scientifique embarquée est d'autant moins évidente que celle-ci est originale, et donc que le processus de conception est incertain (rappelons que cette question peut être résolue plus aisément pour les satellites de télécommunications, dont beaucoup sont constitués de sous-systèmes et interfaces standardisés). S'il n'existe pas vraiment de point commun entre ces systèmes, ne vaudrait-il mieux pas adopter une approche système d'autant plus intégrée que les solutions sont à définir, quitte à compartimenter ensuite, dans une phase de moindre incertitude, où la complexité peut être maîtrisée ?

Abordons à présent les conséquences de la modularité organisationnelle. Elle s'avère fort complexe dans le cadre de Myriade. Elle doit de plus tenir compte de l'organisation du Centre

Spatial de Toulouse (CST) qui l'héberge, et qui elle-même est modulaire et encore plus complexe. Le nombre d'interfaces est considérable, et les points de friction nombreux. Un excès de modularité organisationnelle se traduit par une formalisation excessive, un éclatement des centres de responsabilité susceptibles de provoquer des conflits, ainsi qu'un rallongement des temps de réaction incompatible avec les objectifs de cycle de conception accélérés propres à ce programme. Comme le souligne Langlois (*Ibid.*), une modularité optimale minimise les interdépendances en adoptant un découpage optimisé. On peut en conclure que le schéma adopté pour Myriade était une source de problèmes de performance, notamment dans le cadre de la coordination entre les ressources propres à chaque projet et les métiers gérés au sein d'autres départements du CST. Ainsi, l'un des problèmes clés résidait dans l'articulation entre le Programme (organisation orientée projet) et les métiers (les ressources techniques et administratives). Deux questions auxquelles il aurait été utile de répondre sans ambiguïté (ce qui n'était pas le cas lors de notre intervention, d'où les conflits incessants) sont: qui est en charge du Programme, et qui sont les fournisseurs internes. Une organisation basée projet articulée avec les métiers nous paraît la meilleure des solutions dans un tel contexte. Elle allie la capacité de la structure projet à obtenir un résultat, et le développement des compétences de base sur le long terme que seuls les métiers sont susceptibles de gérer (Belleval, *Ibid.*). De plus, dans le cadre de la conception d'un PSC innovant, on peut légitimement s'interroger comme à propos de la définition du système sur la validité de solutions alternatives de type organisation intégrée (co-apprentissage, co-conception, co-développement, et ingénierie simultanée – Midler, 2002) où le langage se construit au fur et à mesure de l'apprentissage innovant que matérialise le processus de conception. Une réforme de fonctionnement vers plus d'intégration et moins de modularité organisationnelle, au moins dans les phases amont du projet, nous semblerait une solution compatible avec des innovations technologiques de rupture. Cependant, au regard des modes de fonctionnement que nous avons observés, l'une des difficultés les plus sérieuses à laquelle serait confronté le CNES, s'il décidait de se réorganiser ainsi, concernerait le manque d'adaptation des processus internes aux impératifs de l'ingénierie simultanée, facteur clé influençant les temps de conception.

La question de la création du langage simultanément avec la conception du système nous amène à l'organisation des différents types de savoir qui par nature sont hétérogènes, mais doivent se coordonner pour converger vers la solution qu'est le PSC. Ainsi que le souligne Argyres (1999), la conception d'un système modulaire à partir d'une organisation modulaire

implique la définition préalable des interfaces entre équipes, ainsi que du langage de travail et des processus qui mènent à la convergence du concept vers un système cohérent; cet investissement non négligeable est donc un préalable à la création de la ligne de produits. Celui-ci n'a cependant pas été pris en compte lors de l'élaboration du cahier des charges de Myriade. N'ayant pas mesuré l'effort initial à mettre en œuvre, le CNES a sous-estimé l'impact de la ligne de produits en particulier sur ses ressources humaines. Un corollaire en a été les importants dépassements de budget et de calendrier, aggravés par la désorganisation des ressources internes et externes au programme. Ainsi, des postes clés restaient à pourvoir, des mois après avoir été demandés et validés, phénomène aggravé par une mobilité interne qui semble insuffisante, ou tout du moins peu en accord avec les impératifs calendaires des missions Myriade.

Le langage de travail, appauvri par la faiblesse des investissements initiaux en de tels actifs immatériels, est en l'état un frein à l'innovation. D'une manière générale, cette définition préalable semble à la fois nécessaire pour permettre à l'équipe projet d'élaborer une solution au travers d'un PSC, et en contradiction avec la volonté de promouvoir une innovation radicale, car elle limite le champ d'interaction des connaissances. Il semblerait donc que l'investissement initial en compétences propre à un système et une organisation modulaires est d'autant plus important que l'incertitude pesant sur la trajectoire technologique est élevée. Au delà d'un certain seuil d'innovation, les économies d'échelle et la réutilisation de certains modules sur plusieurs projets ne peuvent plus contrebalancer cette dépense initiale. Cette constatation semble à nouveau plaider pour une mise en œuvre du savoir au travers de processus plus intégrés, du moins pour la partie mettant en œuvre des innovations radicales. De plus, la gestion des relations contractuelles avec les partenaires industriels du Programme (partie essentielle de la formulation du langage de travail) n'était pas adaptée aux impératifs de la co-conception, du co-développement et de l'ingénierie simultanée ; les processus internes étaient encore trop calqués sur le modèle des appels d'offre portant sur un produit ou une prestation, sans prendre en compte l'intégration en amont des processus de conception.

7. CRITERES DE CHOIX MODULARITE – INTEGRATION POUR UN GPHT

Bien qu'il existe, comme nous l'avons évoqué, une littérature relativement abondante vantant les mérites de la modularité de systèmes et de l'organisation projet associée, notre étude de cas montre que la pertinence d'une telle option est loin d'être évidente dans le cas d'un GPHT. Comment alors choisir entre une approche modulaire et une approche intégrée ? Pour

répondre à une telle question, il nous faut revenir à la nature du PSC et à son mode de conception. Ainsi que nous l'avons exposé au début, deux caractéristiques essentielles marquent la réalisation d'un tel système : l'incertitude du processus de conception, et la complexité. De plus, de nombreuses technologies hétérogènes se combinent dans le dit processus : des communautés de pratique (Wenger *et al.*, 2000) venues d'horizon variés apprennent à travailler ensemble en construisant un langage commun¹⁷. De ce point de vue, la modularité du savoir est in fine une composante incontournable de tels projets. Si celle-ci n'existe pas initialement en raison de la nature idiosyncrasique du problème posé, elle doit être créée dans les phases amont au travers d'une approche intégrée, parmi elles décrites notamment par Midler (2002).

Intéressons nous à présent aux options portant sur le système à concevoir et sur l'organisation. Dans la suite de cette analyse, nous admettons comme plausible l'hypothèse de Sanchez et Mahoney (*Ibid.*) que la création d'un système modulaire au sens de Simon (*Ibid.*) nécessite une organisation modulaire, où chaque équipe est responsable d'un sous-système. A contrario, il semble logique d'admettre que la conception d'un système intégré requiert une organisation projet intégrée. La modularisation d'un système, dont l'un des objectifs est, rappelons le, de maîtriser la complexité implique la connaissance a priori de l'architecture ; alors que certains PSC peuvent être en début de cycle de conception relativement bien définis dans leur grande ligne (si l'on prend l'exemple d'un ouvrage d'art tel qu'un pont suspendu), on ne peut que constater que cette approche est simplement impossible dans le cas de PSC radicalement innovants, i.e. : pour lesquels l'ensemble des solutions possibles est trop vaste, ou la question posée trop vague mérite une exploration préalable¹⁸ (ce qui est le cas pour nombre de projets spatiaux scientifiques). Il nous semble logique d'aborder les phases de haute incertitude de tels projets avec une organisation intégrée.

Modularisation et intégration ne sont pas exclusives l'une de l'autre. Une fois l'architecture système identifiée, une organisation intégrée peut évoluer vers une organisation modulaire. Cette mutation dépend aussi de l'évolution des interactions entre communautés de pratique, de leur capacité à interagir de manière codifiée au moyen des interfaces de langage (Cohendet, Diani, Lerch, 2002) qui se construisent tout au long du processus projet.

8. CONCLUSION

L'originalité de cette étude réside en premier lieu dans la description non pas d'une tentative heureuse, mais d'un échec ; il est paradoxalement plus facile d'en rechercher les causes qu'un succès quelque fois plus difficile à évaluer. Cet échec permet de définir des conditions d'application de principes de modularité dans le cadre de la recherche de performance du grand projet de haute technologie, sujet de plus en plus sensible. D'un point de vue théorique, on peut remarquer d'une part que les limites ainsi trouvées s'inscrivent dans le principe d'invalidation de Popper (1985) ; d'autre part, nous articulons plusieurs types de modularité : celle du système à concevoir, qui va normalement de pair avec l'organisation qui pilote le processus projet ; la modularité du savoir que mettent en œuvre des communautés de pratique, et dont les interfaces se construisent à partir des langages respectifs de travail. Cette dernière était jusqu'à présent peu mobilisée dans la littérature de management de projet. D'un point de vue praxéologique, il faut de même noter que les choix en matière d'organisation de ce type de projet étaient jusqu'à présent le plus souvent le résultat de négociations complexes entre partenaires, sans véritables critères de performance : nous espérons que ce travail apporte un support d'aide à la décision.

L'étude de cas Myriade invite à formuler un certain nombre de conclusions de portée plus générale, relatives quant à la performance du processus de conception des PSC et au management des GPHT. Premièrement, l'organisation projet intégrée est adaptée à la résolution de problèmes dans un environnement incertain généré entre autres par l'innovation radicale ; l'organisation modulaire, en revanche, permet des économies d'échelle (forcément limitées dans le cadre de PSC) et la limitation des effets induits par les boucles de re-conception. Deuxièmement, pour mettre en œuvre un management modulaire des connaissances dans le cadre d'un portefeuille de projets, il faut au préalable définir ce langage commun et le mettre à l'épreuve des faits (contrairement au pilotage intégré, où l'équipe crée son propre langage au fur et à mesure de la pratique). La construction d'un tel actif immatériel représente un investissement d'autant plus important que le besoin d'innovation est fort. Il peut, dans certains cas, se révéler contre-productif : lorsqu'il représente un obstacle à la création de solutions au problème posé, en s'avérant incapable de s'adapter à l'incertitude du processus de conception ; lorsque la dépense initiale n'est pas couverte par les économies d'échelle et la réutilisation de certains modules dans plusieurs projets.

Troisièmement, il n'est pas évident qu'il faille, sur le principe et dans le cadre qui nous intéresse, opposer les organisations modulaires et intégrées. D'une part, elles peuvent se succéder dans le temps : on peut ainsi imaginer une organisation intégrée adaptée au fort degré d'incertitude existant au début du cycle de conception ; lorsque l'essentiel des problèmes liés à l'architecture système sont réglés, il peut devenir plus productif d'adopter une organisation modulaire, puisque le langage de travail et les interfaces peuvent alors être finalisés. D'autre part, ces deux types d'organisation peuvent se compléter : au sein du projet (ressources en propre intégrées ou non), aussi bien que pour les ressources externes.

Les développements futurs que cette étude appelle nous paraissent principalement concerner les domaines de la complexité de systèmes, de la question de la gestion des risques, et de l'influence des interactions entre communautés de pratique sur l'organisation projet. Il nous paraît en effet nécessaire de mieux caractériser la complexité de tels systèmes à partir d'une taxonomie à la fois qualitative, en utilisant par exemple (mais pas exclusivement) celle de Wang et von Tunzelmann (2000) « depth and breadth », et quantitative (liée au nombre de variables du système et leurs interactions croisées). De plus, une question qui reste à aborder est le rôle de la gestion du risque dans un environnement incertain : alors qu'un tel concept semble un oxymoron, la gestion du risque est néanmoins largement utilisée de nos jours pour de tels projets ; peut-on lui donner une signification de type « sensemaking » cher à K. Weick (1995) ? Enfin, les récents développements théoriques en matière de caractérisation des interactions entre communautés de pratique (Cohendet *et al.*, *Ibid.* ; Amin, Cohendet, 2004) nous invitent à proposer dans le futur une taxonomie affinée d'organisation projet qui tienne compte de l'ensemble de ces pistes de recherche.

9. NOTES

¹ Pour Lorino (2001), la performance consiste à optimiser le rapport entre valeur produite (valeur) et valeur détruite (coûts). La performance est donc « tout ce qui, et seulement ce qui, contribue à améliorer la création nette de valeur (a contrario, n'est pas forcément performance ce qui contribue à diminuer le coût ou à augmenter la valeur, isolément, si cela n'améliore pas le solde valeur - coût ou le ratio valeur / coût) ». La performance est liée à la définition d'objectifs stratégiques. Par ailleurs, nous utilisons dans ce papier le terme de « performance technique » comme étant relatif aux caractéristiques techniques du système.

² Pour une définition du pilotage de processus, et notamment du processus projet, on se reportera de même à Lorino (*Ibid.*). Voir aussi Alcouffe, Malleret (2004).

³ Voir notamment Nightingale (2000) et N.A.O. (2004).

⁴ Bureau d'Economie Théorique et Appliquée (CNRS UMR 7522), Pôle Européen de Gestion et d'Economie, Strasbourg.

⁵ Centre de Recherche en Gestion de l'Ecole Polytechnique, (CNRS UMR 7655), Paris.

⁶ Littéralement « CoPS – Complex Product Systems ». On se reportera notamment au numéro de juillet 2000 de Research Policy pour une présentation des travaux sur le sujet.

⁷ Selon Pavitt (1998), Wang et Von Tunzelmann (2000), la technologie est l'ensemble des principes sous-jacents à la nature des produits et des méthodes de production.

⁸ Nous n'abordons pas ici la troisième composante, qui est militaire.

⁹ Les laboratoires scientifiques répondent à des appels d'offre des agences spatiales en proposant des expériences embarquées. Le plus souvent, ces laboratoires ne financent que partiellement la conception et la mise au point de la charge utile. L'agence dispose des compétences quant à la « spatialisation » de la charge utile, et réalise son intégration sur la plate-forme, ainsi que les tests.

¹⁰ Le CNES et la NASA délèguent ou gèrent la maîtrise d'œuvre satellite, au cas par cas ; l'ESA la sous-traite systématiquement.

¹¹ La ligne de produits était constituée :

- des chaînes fonctionnelles de base et de leurs options,
- des moyens sols nécessaires aux supports mission,
- des outils et des processus d'ingénierie nécessaires à la définition d'un satellite avec les chaînes fonctionnelles de base et leurs options,
- des moyens d'intégration et d'essais génériques,
- de la documentation de définition, d'utilisation et d'opération.

¹² Le tronc standard était constitué :

- du calculateur,
- des télécommunications,
- des interfaces bord – sol,
- des modes S.C.A.O. (Système de Contrôle d'Attitude et d'Orbite) de base,
- du conditionnement de puissance.

¹³ Les options portaient sur :

- le système de générateur solaire
 - . nombre
 - . orientation,
- les études d'aménagement (architecture mécanique),
- les études thermiques,
- les modes spécifiques du contrôle d'attitude et d'orbite (logiciel SCAO).

¹⁴ Commercial Off The Shelf étant le terme usuel dans la littérature anglo-saxonne.

¹⁵ Myriade permet ainsi la réalisation d'expériences plus risquées, au résultat plus aléatoire, et ne pouvant être embarquées comme charges utiles secondaires sur d'autres satellites scientifiques ; c'est le cas de Demeter, dont l'objectif est d'étudier les perturbations électromagnétiques de la ionosphère potentiellement liées aux tremblements de terre, et à l'activité sismique (Bouzat, 2002).

¹⁶ Le sous-traitant choisi par le CNES pour l'intégration du système (Latécoère – Soterem) n'est pas un spécialiste du secteur spatial, mais un fournisseur de sous-systèmes et un intégrateur de certains systèmes aéronautiques. Un transfert de technologies a ainsi été organisé pour la conception des processus d'intégration système en ingénierie simultanée. Ce processus une fois arrivé à maturité était susceptible d'être piloté comme un module.

¹⁷ Nous ne développerons pas plus cet aspect dans le cadre de cet article, qui par ailleurs fait l'objet d'autres recherches en cours auxquelles nous participons. Le lecteur intéressé pourra se référer notamment à l'ouvrage de Amin et Cohendet (2004).

¹⁸ Cette exploration préalable peut être éventuellement dissociée sous la forme d'avant-projets (Gautier, Lenfle, 2004).

10. REMERCIEMENTS

Au BETA : Laurent Bach, Patrick Cohendet, Christophe Lerch,. Pour les apports académiques en dehors du laboratoire: Jean-Luc Gaffard, Armand Hatchuel, William Lazonick, Philippe Lorino, Christophe Midler, Patrick Ochs. Au CNES : Jacques Blamont, Charles Bouzat†, Stéphane Janichewski, Alain Oustry.

Outre l'accès aux données, le CNES nous a donné toute liberté quant à l'interprétation du cas. Les vues présentées ici sont donc celles de l'auteur indépendamment de celles de l'Agence.

11. BIBLIOGRAPHIE

- Alcouffe S., Malleret V. (2004), Fondements Conceptuels de l'ABC « à la Française », *Comptabilité Contrôle Audit*, vol. 2pp. 155-178.
- Amin A., Cohendet P. (2004), *Architectures of Knowledge – Firms, Capabilities and Communities*, Oxford University Press.
- Argyres N.S. (1999), "The Impact of Information Technology on Coordination: Evidence from the B-2 "Stealth Bomber"", *Organization Science* 10 (2), 162-180 March-April.
- Baldwin C.K., Clark K. (1997), "Managing in an Age of Modularity", *Harvard Business Review*, vol. 75, p. 84-93.
- Baldwin C.K., Clark K. (2000), *Design Rules (vol. 1): The Power of Modularity*, MIT press, Cambridge.
- Belleval, C. (2002), "Faster Conception of Radically Innovative Systems: the Strategic and Organizational Challenge for Space Agencies", *The Journal of Space Policy* vol. 18 n°3, p.215-219.
- Bouzat, C. (2002), "Myriade, the CNES Micro-Satellite Product Line for Science and Innovation", dans Rycroft, Crosby (Eds), *Smaller Satellites: Bigger Business? Concepts, Applications and Markets for Micro/Nanosatellites in a New Information World*, Kluwer Academic Publishers.
- Brusoni, S., A. Prencipe et K. Pavitt (2001), "Knowledge Specialization, Organizational Coupling, and the Boundaries of the Firm: Why do Firms Know More than they Make?", *Administrative Science Quarterly* vol 46 n°4, p.597-621.
- Charreire, S., et F. Durieux (1999), « Explorer et Tester », dans R. Thiétard et coll., *Méthodes de Recherches en Management*, Dunod.
- Clark K.B., Wheelwright S.C. (1992), *Revolutionizing Product Development*, Free Press.
- CNES, 1998, *Dossier de Programme Missions Microsatellites*, document interne.
- Cohen E. (1992), *Le Colbertisme « High Tech »*, *Economie des Télécom et du Grand Projet*, Pluriel Enquête.

- Cohendet, P., Diani, M., Lerch C. (2002), « Modularité et Organisation », Document de travail, BETA.
- Fernez-Walch S., Triomphe C. (2004), « L’approche plate-forme: le Management de Familles de Projets Articulés autour d’Eléments Communs: Composants, Sous-Systèmes, Plates-formes », dans Garel G., Giard V., Midler C. (coord.), *Faire de la Recherche en management de Projet*, p. 247-279, FNEGE Vuibert.
- Gautier, F., Lenfle, S. (2004), « L’Avant Projet : Définition et Enjeux », dans Garel G., Giard V., Midler C. (coord.), *Faire de la Recherche en management de Projet*, p. 11-34, FNEGE Vuibert.
- Girin, J. (1981), « Quel paradigme pour la Recherche en Gestion », *Economies et Sociétés*, série Sciences de gestion num. 2, vol XV, num. 10-11-12.
- Hobday M., Rush H. (1999), “Technology Management in Complex Product Systems (CoPS) : Ten Questions Answered”, *International Journal of Technology Management, Special Issue : « Emerging Trends in Technology Strategy Development »*.
- Hobday, M., Rush H., Tidd J. (2000), “Innovation in Complex Products and Systems”, *Research Policy*, vol. 29, July.
- Johnson S.B. (2002), *The Secret of Apollo: Systems Management in American and European Space Programs*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Koenig G. (1993), « Production de la Connaissance et Constitution des Pratiques Organisationnelles », *Revue de Gestion des Ressources Humaines*, n° 9, p. 4-17, novembre.
- Langlois R.N. (2002), “Modularity in Technology and Organization”, *Journal of Economic Behavior & Organization*, 49(19-37).
- Le Moigne, JL. (1999), *La Modélisation des Systèmes Complexes*, Dunod.
- Lorino, P. (2001), *Méthodes et Pratiques de la Performance – Le Pilotage par les Processus et les Compétences*, Editions d’Organisation.
- McCurdy H.E. (2001), *Faster Better Cheaper – Low Cost Innovation in the U.S. Space Program*, The John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.
- Midler C. (2002), “Intensive Innovation Context and Design System Dynamics – The Case of Car Information Communication Entertainment (ICE) Systems”, in (K. Sahlin-Anderson et A. Söderholm), *Beyond Project Management – New Perspectives on the Temporary-Permanent Dilemma*, Copenhagen Business School Press.

- Morris, Hough (1987), *The Anatomy of Major Projects – A Study of the Reality of Project Management*, Wiley.
- N.A.O. (2004), *National Audit Office - Ministry of Defence - Major Projects Report 2003*, London: The Stationery Office.
- NASA (1998), *Technology Plan*.
- Nightingale, P. (2000), “The Product-Process-Organisation Relationship in Complex Development Projects”, *Research Policy* vol.29, p. 913-930.
- Pavitt K. (1998), “Technology, Products an Organisation in the Innovating Firm: What Adam Smith Tells us and Joseph Schumpeter doesn’t”, *Industrial and Corporate Change*, 7: 433-452.
- Popper K.R. (1985), *Conjectures et Réfutations*, Payot, Paris.
- Sanchez R. (1994), “Towards a Science of Strategic Product Design”, *Paper presented at the Second International product Development Management Conference on New Approaches to Development and Engineering, 30-31 May 1994, Gothenburg, Sweden*.
- Sanchez R. (1995), “Strategic Flexibility in Product Competition”, *Strategic Management Journal, Summer Special Issue, vol. 16, pp. 135-159*.
- Sanchez, R. et J.T. Mahoney (1996), “Modularity, Flexibility and Knowledge Management in Product and Organization Design”, *Strategic Management Journal*, vol. 17, Winter Special Issue, pp. 63-76.
- Sapolsky, H.M. (1972), *The Polaris System Development: Bureaucratic and Programmatic Success in Government*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Simon, H.A. (1962), “The Architecture of Complexity”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106, pp. 467-482.
- Ulrich K.T., Eppinger S.D. (1995), *Product Design and Development*, McGraw Hill, New York.
- Wang Q., Von Tunzelmann N. (2000), “Complexity and the Functions of the Firm: Breadth and Depth”, *Research Policy*, vol. 29, pp. 805-818.
- Weick K.E. (1995), *Sensemaking in Organizations*, Thousand Oaks, CA.

- Wenger E.C., Snyder W. (2000), "Communities of Practice : the Organizational Frontier", *Harvard Business Review*, January-February.