

**MODELE DE CONCEPTION A BASE DE RESEAU DE CONTRADICTIONS.
LE CAS DE LA CONCEPTION DES MICROSATELLITES AU CNES**

Christophe Belleval,

Maître de conférences en Sciences de Gestion

belleval@unistra.fr + 33 3 68 85 21 89

Ioana Deniaud,

Maître de conférences en Sciences de Gestion

deniaud@unistra.fr + 33 3 68 85 21 91

Christophe Lerch,

Maître de conférences en Sciences de Gestion

lerch@unistra.fr +33 3 68 85 21 95

Adresse professionnelle

BETA, CNRS UMR 7522

Université de Strasbourg ★ 61 avenue de la Forêt Noire ★ F-67085 Strasbourg Cedex

Résumé : La conception de produits complexes doit faire face à des évolutions techniques et organisationnelles continues qui obligent à surmonter des exigences de plus en plus « serrées » pour rester compétitifs. Ces exigences aboutissent souvent à des contradictions sur les plans technique, organisationnel et cognitif. Nous proposons un modèle de conception basée sur l’approche Ingénierie Système et le langage UML. Ce modèle permet de mettre en évidence la co-évolution du système-produit, système-projet (processus de conception innovante) et de l’organisation (entreprise).

Mots clés : Conception, innovation, exigences, contradictions, ingénierie système.

Summary: Complex product design copes with continuous technical and organizational evolutions. That obliges to overcome “tight” requirements to remain more and more competitive. These requirements often lead to contradictions on the technical, organizational and cognitive dimensions. We propose a design model based on the System Engineering approach and UML language. This model makes it possible to highlight co-evolution of the system-of-interest, system-project (innovating design process) and organization (company).

<http://isdm.univ-tln.fr>

Keywords: Design, innovation, requirements, contradictions, system engineering.

Modèle de conception à base de réseau de contradictions. Le cas de la conception des microsattellites au CNES.

1 - INTRODUCTION

Sous la pression croissante de la demande des clients, les entreprises sont contraintes d'offrir des produits de plus en plus diversifiés et complexes. La maîtrise de leur processus de conception et de leur capacité d'innovation devient un enjeu majeur. Un grand nombre de chercheurs essaient de comprendre les activités du processus de conception innovante. Ce processus est reconnu comme un processus critique, car il définit les caractéristiques d'un produit futur.

La conception est une activité professionnelle initiée par la formulation d'un problème spécifique (problème de conception, besoin à satisfaire) et qui se conclut par la réalisation d'une solution satisfaisante (*artefact*) (Simon, 1969). En tant qu'activité professionnelle, la conception (a) est collective, instrumentée (Visser, 1992), organisée (structurée par le produit et ses différents modèles) (Pahl *et al.*, 2007), (b) requiert et développe à la fois des connaissances scientifiques, techniques (empiriques) et technologiques (méthodes) (Hubka, 1982), (c) est pilotable (Midler, 1993).

Le processus de conception est difficile à appréhender car plusieurs dimensions sont à prendre en compte et cela génère une grande complexité. La nécessité de la prise en compte du caractère multidimensionnel est soulignée par différents chercheurs. Ainsi, Pimpler et Eppinger (1994) ont montré l'existence de trois espaces interdépendants : ceux du produit (quoi faire ?), du projet de conception (comment faire ?) et des acteurs (qui fait ?). Aussi, Nightingale (2000) soulève le fait que les connaissances, les technologies et l'organisation sont en corrélation. Il soutient que l'interaction entre les activités de résolution des problèmes techniques et l'organisation du processus de conception a un impact sur le nombre d'itérations dans le processus (projet) de conception et a des implications sur la performance du projet (coût, délais, qualité). Les travaux de Robin et

Girard (2006) abordent également une approche tridimensionnelles : produit – processus – organisation pour piloter le développement de produits / systèmes. Dans le même contexte se place le projet RNTL IPPOP (Roucoules *et al.*, 2006). D'autres chercheurs montrent que le processus de conception est structuré en trois niveaux : macro, meso et micro (Micaëlli et Forest, 2003) et que les objectifs de ce processus se déploient en suivant ces niveaux (Deniaud, 2007).

En intégrant ces différentes dimensions, nous proposons un modèle de processus de conception dans une situation d'innovation produit. Dans ce cas, le problème de conception n'est pas encore bien défini et des contradictions dans ces différentes « dimensions » peuvent survenir. Nous restons à un niveau de modélisation global en proposant un modèle qualitatif d'aide à l'analyse lors de la conception de produits complexes.

Dans cet article, nous nous appuyons sur le cas du programme Myriade du CNES qui avait pour objectif la conception de microsattellites. Comme l'ont montré Valerdi et Davidz (2009), la recherche empirique nous donne des opportunités pour généraliser et avancer dans la maîtrise de l'ingénierie système.

2 - LE PROGRAMME MYRIADE

En 1998, le CNES lance un grand programme visant à compléter l'offre de plateformes satellites : le programme Myriade, qui a pour objectif la réalisation d'une ligne de produits de microsattellites en orbite basse. Les satellites sont destinés à être notamment lancés en tant que charge auxiliaire par Ariane 5 et prioritairement affectés à des missions scientifiques (la Direction Générale de l'Armement utilisant néanmoins la plate-forme pour un programme de démonstrateurs technologiques à destination militaire). Dans ce cas, le système étudié, le microsattellite, est un système finalisé.

« Un système finalisé est un ensemble composite de personnels, de matériels et de logiciels organisés pour que leur interfonctionnement permette, dans un environnement donné, de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu en fournissant des produits ou des services » (Meinadier, 1998). Il a les caractéristiques suivantes :

- complexité : les propriétés d'un système résultent non seulement des propriétés de ses constituants mais aussi de leurs interactions ;
- hétérogénéité : des constituants, des métiers impliqués, des fournisseurs, des standards ;
- présence d'hommes : non-déterminisme.

En utilisant le classement de la norme européenne d'ingénierie de systèmes spatiaux ECSS-E-10A (Meinadier, 1998), nous pouvons identifier les exigences suivantes.

Les *exigences fonctionnelles* expriment ce que doit faire le système et avec quelle performance. Elles constituent la base sur laquelle se fondera la conception fonctionnelle (fonctions, architecture fonctionnelle). Nous ne rentrons pas dans leur détail, car non pertinent pour cet article.

Les *exigences non fonctionnelles* guideront les choix au cours de la conception organique (constituants, architecture physique). Elles se décomposent en *exigences physiques* (e.g. masse < 120 kg, volume < 1 m³, puissance embarquée 100 W environ nécessitant des arbitrages serrés entre la charge utile et les sous-systèmes de la plate-forme), en *exigences de qualité de service* (e.g. coût de revient < 3 millions d'euros (contre plusieurs centaines de millions d'euros pour les satellites classiques), délai de réalisation d'environ deux ans (contre une dizaine d'années pour les satellites classiques), durée de vie opérationnelle > 2 ans, utilisation de composants électroniques « spatialisés » (*Commercial off-the-Shelf*)), en *exigences opérationnelles et de maintenance* (e.g. autonomie, contrôle depuis le sol, etc.) et en *exigences de vérification et validation* (e.g. tests et essais, inspections, etc.).

La réponse à ces exigences non-fonctionnelles implique également des choix technologiques nouveaux pour certains sous-systèmes et composants (e.g. informatique et télécommunications), l'essentiel de la R&D étant effectuée hors secteur spatial.

D'autres exigences apparaissent au fur et à mesure dans le système de gestion de projet de conception et dans l'organisation même du CNES : les exigences d'organisation et gestion de projet et les exigences cognitives.

L'ensemble des exigences qu'on vient de mentionner conduisent à repenser la gestion de projet (selon l'ingénierie concourante), les méthodes de maîtrise des risques (redéfinition de nouveaux risques acceptables, tel que la tolérance de panne), la gestion de la qualité (qui doit notamment permettre de « spatialiser » certains composant « civils »), les relations clients - fournisseurs. L'accélération du cycle de développement nécessite notamment l'allègement du formalisme de gestion, limitation de la documentation, la standardisation des outils de conception.

Le programme Myriade doit engager ses acteurs dans une évolution de leurs théories de l'action au sens d'Argyris et Schön (1978). Il s'agit de remplacer la philosophie « *Mission Success First* » qui privilégie, comme son nom l'indique, la fiabilité et la robustesse des systèmes sur tous les autres aspects de la performance, par la philosophie « *Smaller, Faster, Better, Cheaper* » inspirée par la politique menée par Dan Goldin, administrateur de la NASA dès le début des années 1990.

Cette présentation des exigences n'est pas exhaustive. Elle se limite à la compréhension du cas avec un point de vue spécifique à cet article.

Pour représenter l'ensemble des exigences et leurs liens lors du projet de conception, nous utilisons le diagramme de classes suivant (figure 1).

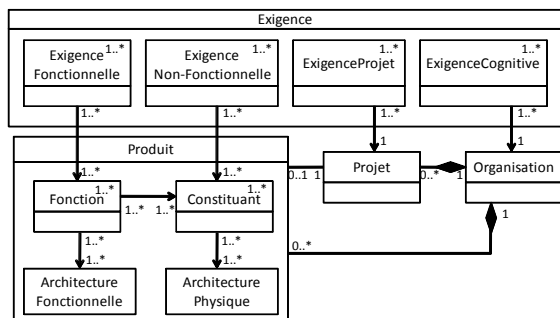


Figure 1 : Le modèle des exigences

La spécificité du programme Myriade est liée au fait que sa mise en œuvre suppose que le CNES opère des évolutions majeures concernant le concept de satellite et la technologie qui le sous-tend, l'organisation du travail et notamment la gestion des projets, la culture ou la théorie de l'action des acteurs de l'entreprise.

Myriade constitue une véritable innovation de rupture dans la mesure où ce programme révolutionne simultanément l'offre de satellites (rupture au sens de Christensen (2000)) et le paradigme dominant de production des satellites au CNES (rupture au sens de Hamel (1994)). On est dans le cas d'une innovation produit – projet de conception – organisation. C'est pourquoi nous allons analyser par la suite le processus de conception innovante.

3 - PROCESSUS DE CONCEPTION INNOVANTE

3.1 - L'innovation

Lorsque le mot innovation est évoqué, il est fréquent de ne penser qu'au lancement d'un nouveau produit sur le marché. Toutefois, et pour s'en tenir au seul domaine industriel, l'innovation concerne aussi les organisations des entreprises, comme le montre l'exemple du Toyotisme qui, en Occident, s'est substitué en deux décennies au Taylorisme-Fordisme. Mener à bien ce type d'innovation suppose, de la part des entreprises, la compétence à organiser au mieux les activités liées à la conception innovante (proposer des concepts inventifs, surmonter leurs contradictions éventuelles, créer et tester de nouvelles solutions, etc.) et ce, dans des délais de plus en plus courts, alors même que le futur système de production gagne en exigences et en complexité. Pour résoudre cet important

problème, de nouveaux concepts d'organisation de la conception ont été développés, notamment l'Ingénierie Système.

L'innovation concerne donc non seulement le produit mais aussi le projet de conception et même les acteurs (dans leur organisation et leur mode de réflexion). Le problème qui se pose alors est d'organiser au mieux le processus de conception innovante et les hommes mettant en œuvre ce processus.

3.2 – Approche classique de la conception

L'approche classique consiste seulement en la résolution d'un problème : « *Design in problem solving* » (Simon, 1969). Selon Simon, une grande partie des problèmes de conception peut être résolue par des heuristiques qui appartiennent à une décision « limitée » du concepteur. Dans l'espace des solutions, toutes les combinaisons sont théoriquement possibles mais pratiquement impossibles à explorer en totalité. Les concepteurs sont vus comme des techniciens de résolution de problèmes faisant appel à des connaissances formelles. Le problème une fois posé au concepteur reste invariant. Simon n'évoque pas la possibilité de retour sur la définition du problème. Mais cette vision ne concerne qu'une partie des processus de conception (liée plutôt à des reconceptions ou améliorations d'un produit existant et moins à un processus innovant).

Un des modèles les plus utilisés est celui de Pahl et Beitz (2007). Ce modèle est adapté à la conception de produits mécaniques compliqués (beaucoup de composants mais décomposable) mais ne convient pas à la conception d'un système-produit complexe. Dans le cas des microsatellites, son utilisation posera plusieurs problèmes.

Le premier est le problème de complexité du système-produit et du projet. Le satellite est un système complexe, un ensemble composite de matériels (mécanique, électrique, etc.), de logiciels et de personnes en interaction à l'aide de diverses interfaces (celui qui pilote à distance le satellite, celui qui conçoit, etc.). Toutes les interfaces avec l'environnement externe doivent être prises en compte lors de la conception (modèle boîte noire), par exemple : tous les facteurs liés au lancement du satellite (interface, phénomènes de vibrations,

variations de température, etc.), ainsi qu'à son évolution dans le milieu spatial.

Le deuxième est le problème de prise en compte de l'effet système. Il ne permet pas de prendre en compte les interactions entre les constituants du système-produit, par exemple : les possibles effets perturbateurs induits par le champ électromagnétique généré par un sous-système sur les autres éléments du système.

Le troisième est le problème de prise en compte de toutes les parties prenantes. Par exemple, pour le satellite, parmi les parties prenantes on a l'opérateur du satellite et celui de la charge utile. Mais la première phase du modèle de Pahl et Beitz « clarification de la tâche », est très peu développée. Même Pahl revient sur le sujet dans un article de 1999 (Choulier, 2008).

Pour pallier à ces inconvénients, de nouvelles théories de la conception ont été proposées.

3.3 - Nouvelles approches de la conception

La conception ne peut plus se restreindre à la résolution de problèmes. La résolution de problèmes est vue seulement comme une étape de conception. Plusieurs auteurs s'opposent à cette vision « simonienne » (Choulier, 2008).

Liu (2000) explique qu'un problème mal défini remet en cause à la fois l'évaluation de la solution, la définition de l'espace du problème et l'existence des règles explicites de connaissance pour sa résolution. Une étape de structuration du problème est ainsi un préalable à sa résolution.

Cross (2001) va encore plus loin en soulignant la co-évolution problème / solution : les problèmes mal définis sont des problèmes qui ne peuvent pas être formulés de façon définitive. La compréhension du problème et sa résolution vont de pair. La formulation du problème s'enrichit progressivement au fil de la considération de nouvelles hypothèses de solutions.

D'après Schön, les concepteurs font plus qu'appliquer des connaissances. Si la réflexion sur l'action (à posteriori) permet de construire des connaissances, la réflexion en cours d'action la complète (Schön, 1995).

Un pas important vers une théorie de la conception nécessite le concept de rationalité

étendue et le principe de l'action collective (Hatchuel, 2002). La théorie C-K (*Concept-Knowledge*) pose une distinction formelle entre l'espace des concepts et l'espace des connaissances. Le raisonnement de conception est la co-évolution par interaction de ces deux ensembles (Hatchuel, 2002).

Enfin, Simon lui-même émet une critique dans un article de 1973 sur la structure des problèmes mal définis (« *The structure of ill defined problem* ») (Choulier, 2008).

3.4 - Définition de la conception innovante

En tenant compte de ces apports, nous considérons que la conception innovante se caractérise par :

- l'énoncé d'un problème non ou mal défini et non résolu. Le travail ne peut s'appuyer sur un cahier des charges précis ou sur une définition identitaire précise de ce qui est à concevoir (Hatchuel, 2002 ; Choulier, 2008) ;
- le problème à résoudre est contradictoire. Un ensemble de contradictions techniques, organisationnelles et cognitives doit être levé (Belleval et Lerch, 2010) ;
- un processus non structuré (exploratoire), qui se caractérise par le fait que l'objectif se construit pendant le déroulement des activités, au cours de négociations entre les acteurs, l'acquisition de compétences nouvelles qui permettent, en fin de processus, d'envisager une solution qui n'était pas envisageable au début (Lerch, 1998) ;
- la réalisation d'une solution nouvelle et adaptée, susceptible de concurrencer les éventuelles solutions existantes ;
- la construction de nouveaux savoirs qui émergent pendant le déroulement des activités de conception (Lerch, 1998).

Nous pensons que les concepts, les processus et la méthodologie de l'Ingénierie Système (IS) nous permettent de prendre en compte une grande partie de ces caractéristiques.

4 - INGÉNIERIE SYSTÈME

L'IS (Ingénierie Système) a été développée dans les années 1960 par la NASA pour répondre à l'accroissement de la complexité des systèmes spatiaux. « L'IS a pour objectifs fondamentaux de garantir l'adéquation du système aux réels besoins par une juste spécification des exigences, de prédire les propriétés et comportements du système et de les garantir par la conception d'une architecture adéquate. » (Meinadier, 1998).

D'après l'AFIS (2009), « l'IS est un processus coopératif et interdisciplinaire de résolution de problème. » On retrouve ici à la fois l'idée de la conception comme processus de résolution de problème et celle de l'interdisciplinarité qui va poser des problèmes spécifiques de coordination. Ensuite, « ce processus est mis en œuvre pour définir, faire évoluer et vérifier la définition d'un système. » Derrière le mot évolution, on sent bien que l'on peut envisager une simple incrémentation de l'existant, mais que parfois l'évolution pourrait aboutir à une rupture.

Nous utilisons les normes concernant l'IS : IEEE 1220 (2005), EIA 632 (1994), ISO 15288 (2002) pour donner une dimension générique à nos résultats au niveau méthodologique. Selon ces normes d'IS, le cycle de vie d'un système comporte deux phases.

La première est la phase de conceptualisation, qui est réalisée pour évaluer de nouvelles opportunités d'affaires et pour développer (i) des exigences préliminaires du système et (ii) une solution de conception faisable.

La seconde est la phase de développement, qui est réalisée pour concevoir un système-étudié qui satisfait les exigences et qui peut être fabriqué, intégré, vérifié (que cela fonctionne comme les concepteurs l'ont prévu), validé (que cela corresponde aux besoins de clients). Le modèle de développement en V d'après Forsberg et Mooz (1991) reprend ces étapes (figure 2).

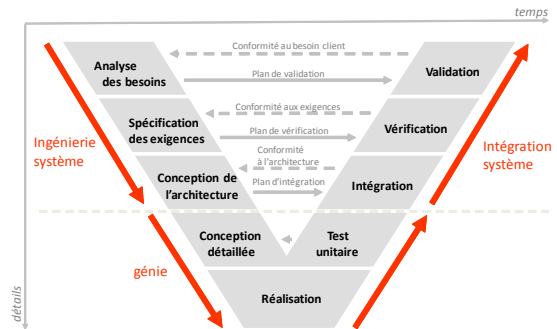


Figure 2 : Cycle en V

Le Cycle en V est un modèle de référence qui représente la logique de développement d'un système complexe. Dans le cadre d'un système complexe, comme le satellite, la première chose à faire est de bien poser le problème et de bien le structurer. Par exemple, « l'analyse et l'allocation des exigences » permettent de prendre en compte et de suivre tout au long du projet les exigences de toutes les parties prenantes.

Des exigences induites apparaissent lors de la descente du cycle en V ce qui pourrait générer de nouveaux problèmes à résoudre. Cela remet en cause le système, permet de tester de nouvelles hypothèses et d'explorer des phénomènes inconnus. Les concepteurs peuvent créer des connaissances nouvelles par une « réflexion en cours d'action » (Schön, 1995). On retrouve donc une co-évolution entre la structuration du problème et de la solution. Donc, dans ce modèle, le processus de conception n'est pas vu comme un processus de résolution de problème. L'approche « résolution de problèmes » pourra s'appliquer seulement lorsqu'on est dans l'étape « conception détaillée » du cycle en V et donc dans la conception de constituants qui peuvent être conçus chacun par un seul génie (métier) en utilisant par exemple le modèle de Pahl et Beitz en mécanique.

5 - MODÈLE DE SYSTÈME DE CONTRADICTIONS

5.1 - Analyse des exigences

Les clients et les autres parties prenantes expriment un ensemble de besoins qui se retrouvent dans le cahier des charges fonctionnel (CdCF). En fait, le CdCF définit l'espace du problème sous l'angle des besoins

fonctionnels sans s’immiscer dans le choix de solutions. Les besoins sont traduits par la suite en exigences. La spécification des exigences est la transcription du CdCF en un ensemble d’exigences qualifiées et si possible quantifiées dont on aura vérifié la cohérence, la complétude ainsi que la faisabilité dans le coût et les délais (Meinadier, 1998) (figure 3). « L’incomplétude de la spécification des exigences est une cause majeure de problèmes dans la suite du projet. Elles conduisent à une forme pathologique de spécification (spécifications rampantes), qui continue pendant le développement de la solution, remettant indéfiniment en cause ce qui a été fait, avec toutes les conséquences sur les coûts et les délais » (Meinadier, 1998). D’autres exigences peuvent apparaître tout au long du projet de conception lors de l’allocation et la dérivation des exigences techniques du système dans la descente du cycle en V.

L’étape de « conception de l’architecture » peut donner naissance à des contradictions, plus précisément lors du passage de l’architecture fonctionnelle à l’architecture organique. Une contradiction résulte d’un conflit entre deux exigences A et B :

- l’amélioration de la performance A conduit à la dégradation de la performance B. Par exemple, la réduction de la masse du calculateur embarqué conduit à la réduction de sa puissance de calcul ;
- les performances A et B sont opposées. Par exemple, l’antenne radio doit être courte pour limiter l’encombrement et longue pour faciliter la réception.

Le résultat final prendra une orientation différente selon que les acteurs en charge de la conception parviennent à résoudre le système d’exigences grâce à un arbitrage ou en dépassant une contradiction. Pour expliquer ce comportement, nous proposons un modèle sous forme de diagramme d’activités UML (figure 3).

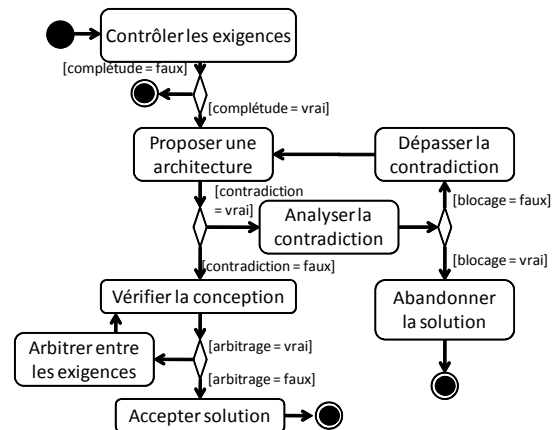


Figure 3 : Modèle d’analyse exigences - contradictions

Dans ce modèle, s’il s’agit d’arbitrage, les acteurs exploitent une base de connaissances connues. Selon Le Masson *et al.* (2006) « la solution était déjà là et il suffisait d’aller la chercher ». L’arbitrage est donc susceptible d’aboutir à une solution de compromis de type innovation incrémentale.

Si les exigences aboutissent à des contradictions excluant l’arbitrage lors de la proposition d’une architecture organique, deux situations sont envisageables.

Dans la première, la contradiction possède un caractère insurmontable, dans la mesure où elle réduit à néant l’espace des solutions. Nous sommes alors dans un contexte de blocage (abandon du projet initial) qui peut lui-même aboutir à une redéfinition des exigences initiales et donc du projet de conception.

Dans la seconde, la contradiction, comme le montre Altshuller (1984) dans TRIZ, est à l’origine de tensions créatrices. On aboutit alors à une solution de type innovation radicale, qui surmonte les contradictions et ne se contente pas de réaliser un compromis. Pour reprendre la vision d’Hatchuel, Weil et Le Masson (2006), la solution n’existe pas au début et la solution s’élabore non pas à travers une exploration d’un espace de solutions mais à travers une expansion de cet espace. Cette fois, la définition même du concept d’expansion s’en trouve modifiée par un processus d’acquisition des connaissances.

L’ensemble des exigences concerne à la fois :

- les caractéristiques techniques du produit ;

- l'organisation du projet (processus) de conception ;
- l'organisation même de l'entreprise, notamment de ses acteurs.

En fait, on a trois dimensions de déploiement des exigences dans les cycles en V : produit, projet de conception et organisation. Plusieurs cycles en V sont imbriqués dans la structuration de classes suivante (figure 4).

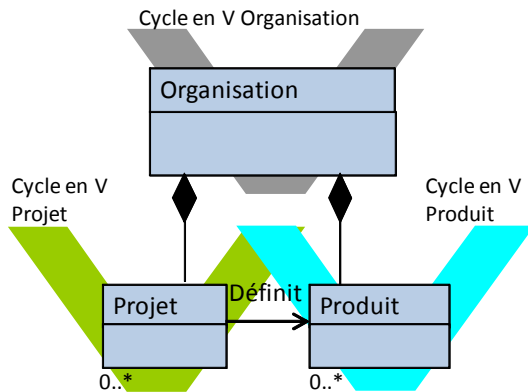


Figure 4 : Cycles en V imbriqués

Des contradictions peuvent apparaître dans chacune de ces dimensions.

5.2 - Modèle à base de contradictions dans le processus de conception de microsattellites

Le concept de contradiction constitue un élément invariant permettant de modéliser le processus de conception innovante. Ces contradictions peuvent être de nature différente : contradictions techniques, organisationnelles ou cognitives (Belleval et Lerch, 2010).

QuickTime™ et un décompresseur sont requis pour visionner cette image.

Figure 5 : Cheminement de contradictions techniques – cognitives – organisationnelles

Le cheminement du programme Myriade entre les différents types de contradictions met effectivement en évidence les étapes-clés qui ont empêché l'émergence d'une offre de rupture (figure 5).

En premier lieu, les spécifications du système introduisirent des contraintes nouvelles en termes de masse, de délai de conception et de coûts. Ces contraintes, ne pouvant être résolues par un arbitrage à partir de la technologie disponible au Centre Spatial de Toulouse (le

CST est l'établissement du CNES en charge des programmes de satellites), aboutirent à l'émergence de contradictions techniques (1). Plus précisément, dans le cas du calculateur, les contraintes de réduction de masse et de puissance électrique entrèrent en contradiction avec celles d'augmentation de puissance de calcul. Cette contradiction technique n'a pas donné lieu à un blocage dans un premier temps. En effet, les ingénieurs du programme Myriade réussirent à élaborer une solution inventive (2) résultant de l'adaptation de

<http://isdm.univ-tln.fr>

technologies non spatiales. À ce stade, on pouvait espérer que la conception du système aboutirait.

Cependant, alors que le problème technique semblait résolu, l'option technologique proposée allait engendrer une autre contradiction, cette fois dans la dimension cognitive : les représentations individuelles et collectives de la communauté des ingénieurs du CNES étaient de ce fait remises en question (3a).

La nouvelle technologie, et l'orientation stratégique « *Faster Better Cheaper* » qui la sous-tend, étaient trop éloignées des modèles mentaux et de l'expérience des ingénieurs du CST qui défendaient la logique « *Mission Success First* ». De plus, aucune préparation en amont sous la forme par exemple d'une coopération avec SSTL (société britannique spécialiste des microsatellites, qui avait proposé ses services) n'avait été mise en œuvre en vue de préparer le terrain à ces nouvelles pratiques. Les ingénieurs de la Direction des Techniques Spatiales (DTS), structure métier du CST dont la coopération était indispensable, refusèrent alors les solutions proposées par l'équipe Myriade, manifestant ainsi un blocage cognitif (4a).

Le fonctionnement pathologique de l'organisation n'apparaît qu'au stade de ce blocage. En amont, les conflits entre les représentations partiales des acteurs manifestaient seulement un signe fort que Myriade constituait bien une rupture susceptible de faire évoluer de manière significative les connaissances et les pratiques des ingénieurs du CNES.

Ce blocage souligne en creux l'existence d'une troisième contradiction cette fois de type organisationnel. Le CNES est une structure bureaucratique orientée vers l'exploitation de solutions technologiquement maîtrisées. Son orientation « *Mission Success First* » privilégie des processus de conception linéaire et cloisonnés impliquant de nombreuses boucles de rétroaction coûteuses en temps. Or, avec Myriade, on se proposait de développer une structure organique orientée vers l'exploration de solutions technologiquement nouvelles. Cette orientation impliquait des processus de

conception simultanés, particulièrement réactifs et intégrés.

Cette contradiction organisationnelle (3b) résultait de l'obligation pour le CST de gérer simultanément des processus de conception maîtrisés, et celui de Myriade dont le caractère était nettement plus exploratoire, la cohabitation des deux générant des niveaux différenciés d'incertitude.

Or, en refusant d'emblée l'idée de créer une unité organisationnelle autonome pour Myriade, les responsables du CNES se privèrent d'une option qui aurait permis de dépasser cette contradiction par l'ambidextrie organisationnelle. Il aurait été possible de différencier les deux types de conception par nature distincts et de créer des mécanismes d'intégration permettant de profiter des synergies entre les deux domaines d'activité selon les principes de Tushman et O'Reilly III (1996).

Cette option étant écartée, il était inévitable que les deux logiques d'exploitation et d'exploration rentrassent en conflit l'une avec l'autre. On aboutit alors à un blocage organisationnel (4b). La combinaison de ce dernier avec le blocage cognitif déboucha sur un blocage technique (4c), la DTS imposant son veto.

Dans le but de restaurer la maîtrise des processus, le nouveau Directeur Général du CNES décida *in fine* de restreindre les ambitions du programme et d'assurer l'obligation de résultat envers la communauté scientifique qui s'était engagée dans la réalisation de charges utiles embarquées, en particulier sur le premier satellite Déméter ; celui-ci reçut la priorité d'affectation des moyens. Les performances envisagées initialement sur le système furent revues à la baisse (arbitrage technique – 5a) : notamment l'allongement du délai de conception, la limitation du recours aux technologies non spatiales, le desserrement de la contrainte de coût. La réalisation du programme s'effectuerait selon les procédés connus et validés au CST (arbitrage cognitif – 5b), et l'organisation du CST ne serait pas changée (arbitrage organisationnel – 5c).

Cette étude de cas montre le lien entre les différents types de contradiction lors d'un

processus de conception et qu'un blocage au niveau d'une seule contradiction peut aboutir à un blocage relatif du projet (une innovation

Les objets obtenus suite à l'instanciation de chacune de ces classes constituent le flux d'objets qui accompagne le flux de contrôle

est pourquoi nous jugeons essentiel de prendre explicitement en compte les contradictions dans les modèles de l'IS afin que les concepteurs y portent une attention particulière et nous proposons par la suite un modèle général pour la gestion des contradictions lors d'un projet de conception.

- Généralisation

Cette approche objet nous permet de reformuler le problème de modélisation autour d'un nombre limité de situations stéréotypées. Pour généraliser le cas étudié, nous proposons la définition d'un diagramme de classes (figure 6).

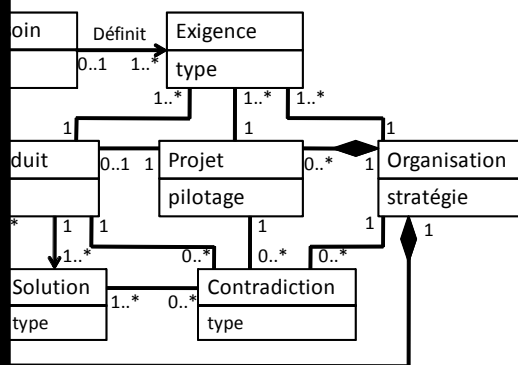


Figure 6 : Les classes dans le modèle de gestion de contradictions

Un besoin du CdCF définit au moins une exigence. Une exigence peut ne provenir d'aucun besoin (exigence induite) et au plus d'un seul besoin. Dans la classe « Contradiction », l'attribut « type » peut prendre les valeurs : « = technique », « = organisationnelle » ou « = cognitive ». Dans la classe « Solution », l'attribut « type » peut prendre les valeurs : « = blocage », « = innovation incrémentale » ou « = innovation radicale ». Dans la classe « Projet » l'attribut « pilotage » peut prendre les valeurs « = hiérarchique » ou « = transversale ». Enfin, dans la classe « Organisation », l'attribut « stratégie » peut prendre les valeurs « = Mission Success First » ou « Faster Better Cheaper ».

L'étude de cas montre que les décisions stratégiques, qui ont permis ou non à une organisation de mettre en œuvre une innovation de rupture, ne sont pas circonscrites dans une seule dimension. Nous avons montré au contraire que ce sont les interactions entre les dimensions techniques, organisationnelles et cognitives qui génèrent l'émergence de la plupart des contradictions qui influent sur l'orientation stratégique du projet. En d'autres termes, il n'existe pas de choix stratégiques purement techniques, organisationnels ou cognitifs : il faut prendre en compte simultanément les trois dimensions. Lors du déploiement des exigences initiales, des contraintes apparaissent dans ces trois dimensions. De plus, ces contraintes peuvent générer des contradictions qui se propagent d'un plan à l'autre. Bien que certaines contradictions techniques puissent être dépassées grâce à des solutions inventives, ces dernières peuvent générer une dissonance cognitive aboutissant à un blocage.

C'est donc la maîtrise des interactions entre les trois dimensions qui est stratégique dans l'orientation du projet de conception. Donc le processus de conception innovante peut être appréhendé comme un cheminement entre des contradictions techniques, organisationnelles et cognitives.

« L'IS a pour objectif de conduire à un bon compromis entre enjeux et contraintes [...] », « L'art de l'IS est d'obtenir du fait des interactions, les comportements synergiques recherchés en maintenant les comportements émergents non intentionnels dans les limites acceptables [...] ». (AFIS, 2009). Nous nous positionnons un peu différemment en soutenant que parfois il n'y a pas de compromis possible. La quête de cette synergie implique parfois le dépassement de contradiction.

En perspective, ce modèle peut être intégré dans un progiciel de gestion de projet de conception. Cela permettrait une représentation

de la décision qui intègre différents points de vue : organisation / produit / projet. Les modèles UML présentés peuvent être transformés en modèle relationnel et implémentés dans une base de données relationnelle permettant de gérer l'intégrité des données et garder la mémoire du projet de conception innovante (Longueville, 2003). Cela permettrait également de vérifier les exigences à chaque étape du processus de conception et d'aboutir à une solution validable sous forme d'un prototype virtuel simulable (Esteban *et al.*, 2009), d'identifier et d'analyser en détail le système de contradictions à travers les outils d'ingénierie système, et de surmonter les éventuelles contradictions techniques, organisationnelles et cognitives, apparues lors du déroulement du projet de conception.

RÉFÉRENCES

- AFIS (2009). www.afis.fr, consulté en septembre 2009.
- Altshuller, G.S. (1984), *Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*, Gordon and Breach Publishers, New-York.
- Argyris, C., Schön, D.A. (1978), *Organizational Learning: A Theory of Action Perspective*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA.
- Belleval, C., Lerch, C. (2010), « L'Innovation Envisagée comme un Processus de Résolutions de Contradictions Techniques, Organisationnelles et Cognitives ». Article de recherche du laboratoire BETA.
- Choulier, D. (2008), *Comprendre l'activité de conception*, Collection Chantiers, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Christensen, C.M. (2000), *The Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press, Boston.
- Cross, N. (2001), *Engineering design methods - Strategies for product development*, 3rd Edition, John Wiley & Sons.
- Deniaud, I. (2007), « Performance evaluation in innovating design towards an integrated mode », *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, n° 2, pp. 12-17.
- EIA / IS 632 (1994), Standard for Processes for Engineering a System.
- Esteban, P., Pascal, J.C., Esteve, D. (2009), « Une méthodologie de Conception Produit basée sur la norme EIA-632 », Congrès de Génie Industriel, (CIGI'2009), Bagnères-de-Bigorre.
- Festinger, L. (1957), *A Theory of Cognitive Dissonance*, Stanford University Press.
- Forsberg, K., Mooz, H. (1991), « The Relationship of System Engineering to the Project Cycle », *Proc. NCOSE Symposium*, pp. 57-65.
- Hamel, G., Prahalad, C.K. (1994), *Competing for the future*, Harvard Business School Press.
- Hatchuel, A. (2002), « Towards Design Theory and expandable rationality: The unfinished program of Herbert Simon ». *Journal of Management and Gouvernance*. Vol. 5: 3-4.
- Hubka, V. (1982), *Principles of Engineering Design*, Butterworth Scientific Press, Guildford.
- IEEE 1220 (2005), IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process.
- ISO / CEI 15288 (2002), Standard for Systems Engineering – System Life Cycle Processes.
- LeMasson, P., Weil, B., Hatchuel, A. (2006), *Les processus d'innovation : Conception innovante et croissance des entreprises*, Hermès Science Publications.
- Lerch, C. (1998), Une nouvelle représentation du contrôle organisationnel, Le pilotage des processus. Thèse de doctorat de Sciences de Gestion, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

- Liu, Y.-T. (2000), « Creativity or Novelty », *Design Studies*. Vol. 21, n° 2, pp. 261-276.
- Longueville, B., Stal Le Cardinal, J., Bocquet, J.-C., Daneau, P. (2003), « Toward a project Memory for Innovative Product Design, a Decision – Making Process Model », International Conference on Engineering Design (ICED'2003), pp. 1-10.
- Micaëlli, J.-P., Forest, J. (2003), *Artificialisme, Introduction à une théorie de la conception*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Meinadier, J.P. (1998), *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermès, Paris.
- Midler, C. (1993), « Gestion de projet, l'entreprise en question », Giard V., Midler C. (Coord), in *Pilotage de projet et entreprise*, ECOSIP, Economica, Paris, pp. 17-31.
- Nightingale, P. (2000), « The product-process-organisation relationship in complex development projects », *Research Policy*. Vol. 29, pp. 913-930.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H. (2007), *Engineering Design, A Systematic Approach*, 3rd Edition, Springer.
- Pimmler, T.U., Eppinger, S.D. (1994), « Integration Analysis of Product Decompositions », Proc. ASME Design Theory and Methodology Conference, Vol. 68, pp. 343-351.
- Robin, V., Girard, P. (2006), « An integrated product-process-organisation model to manage design system », 4th CESA Multiconf. on Computational Engineering in Systems Applications, Pékin, Chine, pp. 1287-1293.
- Roucoules, L., Noël, F., Teissandier, D., Lombard, M., Debarbouillé, G., Girard, P., Merlo, C., Eynard, B. (2006), « IPPOP: an opensource collaborative design platform to link product, design process and industrial organisation information », 6th Int. Conf. on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Grenoble, May 17-19.
- Schön, D.A. (1995), *The reflective practitioner, How Professionals Think in Action*, Ashgate Publishing Limited.
- Simon, A.H. (1969), *The science of the artificial*, MIT Press Cambridge MA, USA.
- Tushman, M. O'Reilly III, C. (1996), « Ambidextrous organizations: managing evolutionary and revolutionary change », *California Management Review*. Vol. 38, n° 4, pp. 8-30.
- Valerdi, R., Davidz, H.L. (2009), « Empirical Research in System Engineering: Callenges and Opportunities of a New Frontier », *System Engineering*. Vol.12, n° 2, pp.169-181.
- Visser, W. (1992), « Raisonement analogique et conception créative : études empiriques de trois projets de conception », 01'Design, 25-27 janvier, Marrakech.