

MODELE DE GESTION DES PROBLEMES DANS UN PROJET DE CONCEPTION : LE CAS DE LA CONCEPTION DES MICROSATELLITES

Christophe BELLEVAL*, Ioana DENIAUD** et Christophe LERCH***

Résumé. - Cet article étudie la résolution des problèmes complexes de conception de produit dans la démarche d'ingénierie système. Nous illustrons notre réflexion par une étude de cas dans le secteur du spatial concernant la conception de microsateellites. Nous postulons que la complexité des problèmes dépend à la fois de la nature des interactions entre les sous-systèmes du produit, et de la difficulté d'aboutir à une formulation acceptable du problème par l'ensemble de l'équipe projet. Notre analyse tend à montrer que si l'ingénierie système est efficace pour décomposer un produit en sous-systèmes et gérer les problèmes d'intégration qui en résultent, elle est parfois prise en défaut dans le cas des problèmes difficiles à formuler dans la mesure où elle ne prend pas explicitement en compte les contradictions techniques, organisationnelles et cognitives inhérentes aux problèmes de conception les plus innovants.

Mots-clés : Conception ; Contradictions ; Ingénierie système ; Cycle en V.

1. Introduction

Dans les secteurs d'activité comme le spatial, la maîtrise de la complexité dans le processus de conception est un enjeu majeur.

* Maître de conférences, BETA, CNRS UMR 7522 - Université de Strasbourg, belleval@unistra.fr.

** Maître de conférences, BETA, CNRS UMR 7522 - Université de Strasbourg, deniaud@unistra.fr.

*** Maître de conférences, BETA, CNRS UMR 7522 - Université de Strasbourg, lerch@unistra.fr.

Selon un grand nombre de chercheurs, la conception s'assimile à une activité de résolution de problèmes. Il s'agit d'identifier une solution satisfaisante (Simon, 1969), au travers d'un processus collectif de résolution de problèmes (Visser, 1992), structurés en plusieurs étapes séquentielles (Pahl et alii, 1996).

Cependant lorsque le problème à résoudre est complexe, la phase de formulation de problème, au travers de l'élaboration du cahier des charges, s'avère critique dans la mesure où les paramètres de conception du système à concevoir sont fortement interdépendants.

Nightingale (2000) soutient que dans le cas de la conception d'un système complexe, la maîtrise de l'incertitude inhérente aux interdépendances entre les sous-systèmes est stratégique. Sans cette maîtrise, le nombre d'itérations dans le processus (projet) de conception a tendance à exploser, et la performance du projet (coût, délais, qualité) à tendance à se dégrader.

L'ingénierie système (IS) constitue une démarche reconnue permettant de mettre en œuvre cette phase cruciale de formalisation du problème de conception. C'est au travers d'une décomposition systémique du produit que 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 émergent non intentionnels dans les limites de l'acceptable... » (AFIS, 2009).

Cependant, la difficulté de l'activité de conception ne réside pas uniquement dans la résolution de problèmes techniques. Pimmler et Epinger (1994) soulignent que la conception implique simultanément : une définition du produit à réaliser (quoi faire ?), une définition des processus à mettre en œuvre (comment faire ?) et des acteurs en charge des activités (qui fait ?). Les exigences ou besoin des clients ne sont jamais directement interprétables en termes de problèmes techniques à résoudre. Selon l'approche axiomatique d'Albano et Suh (1992), le client (ou son représentant à l'intérieur de l'entreprise) exprime initialement un ensemble hiérarchisé de besoins, les performances souhaitées et les pré-requis qui sont traduits en une architecture fonctionnelle : il s'agit de décrire les fonctions du produit, nécessaires à la réponse aux besoins du client. Afin de donner corps à ces fonctions, il est ensuite temps de faire les choix techniques constituant à terme une architecture physique. Enfin, cette dernière est elle-même à la source de la définition d'un ensemble hiérarchisé de procédés ; une des difficultés majeures réside dans la traduction des problèmes de conception d'un espace à un autre. C'est pourquoi, les problèmes de conception sont souvent mal définis (Reitmann, 1964), ou mal structurés (Nevell, 1969 ; Simon, 1973). Les spécifications initiales sont parfois ambiguës, contradictoires et susceptibles d'être modifiées au cours du temps (Visser, 1992).

Dans un travail précédent (Belleval et Lerch, 2010) nous avons montré que dans le cas des produits complexes, l'élaboration d'une conception innovante en rupture avec les pratiques

passées, nécessitait un processus dialectique débouchant sur un ensemble d'arbitrages à réaliser et de contradictions à dépasser. Pour illustrer nos propos, nous nous appuyons sur le cas du programme Myriade qui avait pour objectif la conception de microsattelites au CNES. La quête de cet objectif a fait émerger des exigences contradictoires tant au niveau des spécifications techniques du projet, qu'au niveau des représentations cognitives sous-tendant la dynamique d'apprentissage des acteurs et des performances organisationnelles en termes de management de projet.

Ce cas constitue une occasion pour nous de s'interroger sur les limites de l'IS et de l'IE en tant que démarche de conception. A la manière de Valerdi et Davidz (2009), la recherche empirique nous donne des opportunités pour généraliser et avancer dans la maîtrise de l'ingénierie système.

Plus précisément, nous débiterons par une courte revue de la littérature nous permettant différencier les enjeux en termes de conceptions liés au degré :

- de complexité des problèmes à résoudre ;
- de difficulté à définir les problèmes.

Nous illustrerons ensuite ces deux notions à travers la présentation de l'étude du cas Myriade. Enfin, nous nous interrogerons sur la nature des adaptations nécessaires pour que l'IS, adapté à la résolution de problèmes complexes, soit en mesure de prendre en considération l'émergence d'exigences contradictoires inhérentes aux problèmes difficiles à définir.

2. Processus de conception et de résolution de problème

Pour de nombreux chercheurs, en particulier dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, on considère que l'activité de conception de nouveaux produits est le fruit d'un processus de résolution de problèmes sous contrainte. Selon Visser (2002) pour résoudre un problème de conception, on procède à des activités de trois types : (i) construction d'une représentation mentale (ou « formulation de problèmes » en termes d'autres auteurs), (ii) développement (ou « génération ») d'une solution et (iii) et évaluation de cette solution. La génération d'une solution est susceptible de combiner deux types de difficultés :

- le problème à résoudre peut être compliqué ou complexe en fonction du degré d'interdépendance entre les paramètres de conception (cf §2.1 et §2.2) ;

- le problème à résoudre peut être plus ou bien moins défini en fonction du degré de similarité des problèmes résolus dans le passé, de la diversité et du caractère plus ou moins conflictuel des représentations des acteurs participants au projet.

2.1 Problèmes compliqués versus problèmes complexes à résoudre

Le processus de conception « traditionnel » au sens de Sanchez et Mahoney (1996) est organisé de manière linéaire : un ensemble de sous problèmes hiérarchisés sont résolus de manière séquentielle. Plus précisément, cette organisation implique un déroulement séquentiel des phases de conception des composants. Lorsqu'il existe un blocage à une étape du processus il est nécessaire de réinitialiser l'étape précédente, voire de relancer l'ensemble du processus.

Une telle organisation peut être efficace pour innover de manière incrémentale dans la mesure où le problème à résoudre reste compliqué. C'est le cas lorsque les interdépendances entre les paramètres de conception du système à concevoir sont de nature séquentielle (*decoupled design*), (Suh, 2005). Dès lors, il existe un ordre permettant de définir successivement chaque paramètre sans qu'il ne soit jamais nécessaire de modifier ceux qui ont été définis précédemment.

Dans d'autres circonstances, l'interdépendance entre les paramètres de conception du problème est de nature réciproque (*coupled design*), la décision de modification d'un paramètre est susceptible d'aboutir à un résultat chaotique. L'incertitude générée par l'activité de résolution de problème rend inefficace le processus de conception linéaire, dans la mesure où les coûteuses boucles de reprises ont tendance à se multiplier (Nightingale, 2000).

Lorsque le système à concevoir est complexe Simon (1962) suggère de « gérer la complexité » en réduisant le nombre de composants du système. Il s'agit de regrouper des éléments dans un nombre réduit de sous-systèmes. Le concepteur « rationnellement limité » augmente ainsi sa capacité à identifier des solutions satisfaisantes. Ce principe est à la source de la stratégie modulaire de conception à la Sanchez et Mahoney (1996). La conception préalable d'une architecture composée d'interfaces standardisées permet de rendre quasi indépendante la conception des sous-systèmes qui composent le produit. La modularité permet d'accroître la vitesse de conception des produits (les sous-systèmes sont conçus en parallèle), ainsi que la diversité des produits (par recombinaison de modules). En outre la stratégie modulaire permet d'isoler l'impact de l'incertitude au niveau des sous-systèmes. Cette propriété est d'autant plus appréciable dans un contexte comme celui du secteur spatial où la fiabilité des systèmes est souvent privilégiée par rapport aux autres types de performance.

2.2 L'IS : une organisation du processus de conception visant à maîtriser la complexité des produits

L'IS 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). C'est un processus coopératif et interdisciplinaire de résolution de problèmes ayant pour objectif d'assurer un bon compromis entre les enjeux et les contraintes du système. Comme le souligne le site de l'AFIS, l'art de l'IS c'est aussi d'obtenir, du fait des interactions entre les éléments du système, les comportements synergiques recherchés en maintenant les comportements émergents non intentionnels dans les limites acceptables.

L'IS propose une organisation du processus de conception en V qui combine à la fois un ensemble de tâches à élaborer de manière séquentielle, dans le but de progresser de la définition d'un ensemble d'exigences du client vers la conception d'un système répondant de manière efficace à ces exigences (cf. §2.2.1), ainsi que des tâches en couplages réciproques permettant de s'interroger simultanément sur la formulation des problèmes à résoudre et sur leurs solutions potentielles (cf. §2.2.2).

2.2.1 Une démarche de conception séquentielle visant à structurer le système de manière modulaire

L'IS se structure autour d'une démarche descendante d'ingénierie s'appuyant sur une décomposition du système en blocs constitutifs dont elle définit les constituants avec leurs interfaces (Figure 1). Il s'agit de décomposer le problème afin de faciliter sa résolution : on exploite les avantages de la modularité. Cette démarche descendante se combine avec une démarche ascendante. Il s'agit d'une part d'intégrer dans le système des composants préexistants (composants sur étagère non spécifiques au projet), et d'exploiter les potentialités technologiques de l'entreprise. D'autre part, cette phase vise également à tester l'ensemble des solutions partielles ainsi que la solution globale qui a été conçue précédemment.

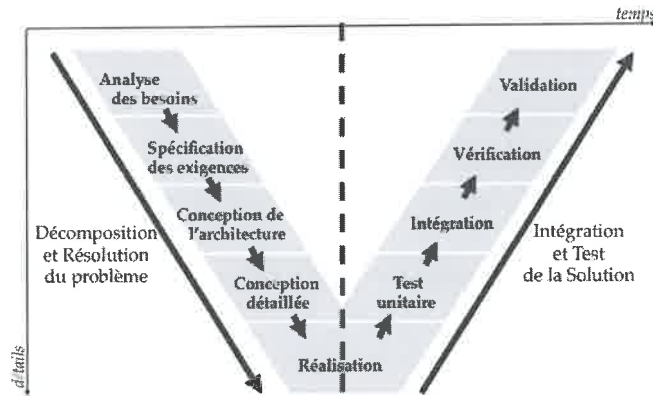


Figure 1 : Démarche séquentiel dans le cycle en V.

La démarche de conception de la solution suit un processus itératif, chaque étape devant être approuvée à partir de la production d'un livrable, avant que la phase suivante puisse démarrée. L'exploration du problème et la spécification de la solution conduit à des visions prescriptives du système, puis de ses sous-systèmes sous forme d'un ensemble d'exigences auxquelles ils devront satisfaire.

2.2.2 Une démarche interactive visant à spécifier progressivement les exigences

L'aspect linéaire et séquentiel du modèle en V ne permet pas de mettre en évidence les rétroactions des phases aval vers les phases amont nécessaires à la finalisation du processus de conception. Ces rétroactions peuvent être générées par la découverte d'erreurs obligeant à remettre en question des phases préalablement validées. Elles sont nécessaires également afin de prendre en compte des comportements émergent non anticipés du système, comportements liés à la difficulté de maîtriser les interactions entre phases de conception, entre niveaux de décomposition de système, ainsi qu'entre les différents cycles de développement (conception, industrialisation).

Selon Meinadier (1998) : « 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 ».

C'est pourquoi, la conception d'une solution robuste qui satisfasse les exigences de l'ensemble des parties prenantes du projet implique donc des mécanismes d'ajustements transversaux permettant tout au long du projet d'affiner la définition des exigences tout en testant la pertinence des solutions proposées (Figure 2).

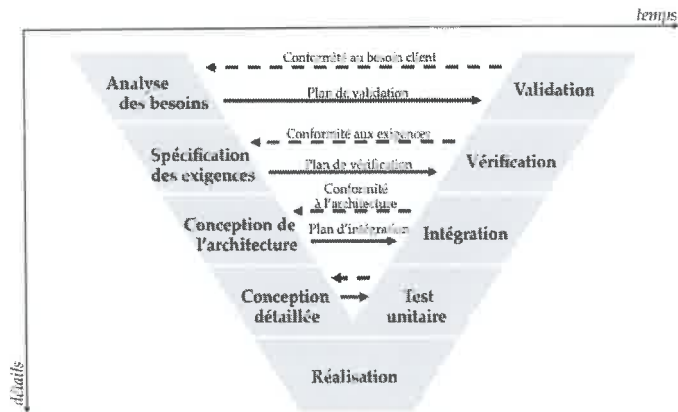


Figure 2 : Démarche concurrente dans le cycle en V.

Cependant la mise en œuvre de l'IS suppose implicitement que le problème soit suffisamment bien défini pour que la solution du problème posée résulte d'un arbitrage entre les contraintes. Or comme nous allons le constater dans le paragraphe suivant, cette situation idéale n'est pas représentative des « problèmes difficiles à définir ».

2.3 Les problèmes difficiles à définir ou la nécessité de prendre en compte les exigences contradictoires

Un problème de conception sera d'autant plus facile à définir (et à résoudre) que sa formulation peut bénéficier de l'exploitation des compétences acquises. Ceci est le cas selon Viesser (2002) lorsque la représentation du problème que l'on souhaite résoudre (le problème cible) est similaire à un problème déjà résolu dans le passé (le problème source). A l'extrême limite, l'activité de conception se borne à un choix, la solution existe déjà, il « suffit » de l'identifier et de la mettre en œuvre.

En d'autres circonstances, la résolution de problèmes implique la génération de solutions créatives nécessitant l'exploration de connaissances nouvelles, parfois mal maîtrisées. C'est pourquoi les problèmes complexes sont souvent mal définis (Reitmann 1964), ou mal structurés (Nevell, 1969 ; Simon, 1973).

Selon Liu (2000) 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) insiste 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).

Dès lors le processus de conception devient non structuré : il se caractérise par le fait que son objectif se construit pendant le déroulement des activités, au cours de négociations entre les acteurs. L'acquisition de compétences et de connaissances nouvelles permettent, en fin de processus, d'envisager une solution qui n'était pas envisageable au début (Lerch, 1998).

Le Masson, Weil et Hatchuel (2006) concluent que la conception serait moins l'art de rechercher des solutions au sein d'un espace prédéfini (selon les principes de la rationalité limitée) que celui de créer de nouveaux espaces de solutions (selon une forme de rationalité qu'ils qualifient d'expansive).

Or, l'activité de conception étant de nature collective, la phase de formulation du problème génère potentiellement des conflits de représentations. Cohen, March et Olsen (1972) suggèrent même que bon nombre d'organisations innovantes fonctionnent comme des anarchies organisées poursuivant par intermittence des buts contradictoires.

Pour répondre à ces problèmes, Clark et Fujimoto (1991) ont conceptualisé la démarche de « *concurrent engineering* » (i.e : ingénierie simultanée ou concourante). C'est par la mise en œuvre de mécanismes d'ajustements mutuels au sein d'équipes projet multidisciplinaires que l'on cherche à converger au plus vite vers un objectif partagé. Parfois, l'existence d'exigences contradictoires dans un cahier des charges est le signe d'une erreur dans la formulation du problème de conception ou l'absence d'une stratégie clairement affirmée. Dans ce cas, une gestion concourante (« *overlapping problem solving* » dans la terminologie de Sanchez et Mahoney (1996)) du processus de résolution (ou formulation) de problème peut être efficace pour clarifier les objectifs à atteindre.

Cependant, la création d'espace de solution radicalement nouveau implique parfois le dépassement de contraintes qui apparaissaient comme contradictoires dans l'état de l'art des connaissances. Cette fois, il ne s'agit pas « simplement » d'effectuer un arbitrage entre des contraintes antagoniques, il s'agit plutôt d'inventer des solutions nouvelles permettant de dépasser les contradictions. Dans un travail précédent, nous avons montré qu'une innovation de rupture pouvait nécessiter le dépassement de contradictions techniques, cognitives et organisationnelles (Belleval et Lerch, 2010). Si l'IS ambitionne de pouvoir aider à la résolution de problèmes dans le cas d'innovation de rupture, elle devrait être en mesure de prendre explicitement en compte ces contradictions, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

3. Le programme Myriade

3.1 *Présentation*

En 1998 le CNES lança une initiative visant à créer de nouvelles opportunités d'emport de charges utiles grâce à la conception et la mise en œuvre d'une ligne de produits de micro-satellites : le programme Myriade. Nouveauté pour le CNES (en dépit de quelques tentatives ponctuelles), le concept de micro-satellites avait été largement expérimenté aux États-Unis et en Grande Bretagne. À la fin des années 50, le département américain de la défense avait déjà testé de tels systèmes. En 1979 l'Université de Surrey (Grande-Bretagne) avait démarré des études sur des petits satellites à prix compétitifs. En 1985 Surrey Satellite Technology LdT (SSTL) fut ainsi créé, entreprise qui devint rapidement l'une des références incontournables dans ce domaine.

Le programme Myriade, traduisait la volonté du CNES de devenir un acteur majeur dans le domaine des micro-satellites. Mais l'offre à laquelle le CNES souhaitait s'attaquer se différenciait sensiblement de celle de SSTL. En effet, à cette époque les Britanniques, concevaient des micro-satellites dont la technologie était relativement rudimentaire : elle excluait la plupart des missions scientifiques requérant notamment la précision de pointage et la puissance de calcul. Pour sa part, le CNES souhaitait développer des satellites de 100 à 120 kg destinés à être lancés essentiellement en tant que charge secondaire par Ariane 5 ou sur des missiles nucléaires russes reconvertis, et prioritairement affectés à des missions scientifiques.

D'une part, cette offre devait constituer une évolution significative du rapport performance technique – coûts ; de ce fait de nouvelles opportunités s'offraient pour des missions scientifiques et des expérimentations technologiques. Le coût de revient devait être plafonné à 3 millions d'euros et le délai de réalisation ne pas dépasser deux ans (contre plusieurs centaines de millions d'euros et une dizaine d'années pour les satellites classiques). De plus, un atelier d'ingénierie simultanée serait créé pour l'occasion. La conception des satellites (hors charge utile) devrait s'appuyer sur une ligne de produits constituée d'un tronc commun et d'options (CNES, 1998). Un nouveau domaine d'activité s'ouvrait donc autant pour l'agence spatiale que pour les utilisateurs.

Comme nous allons le voir par la suite, la mise en œuvre de ce programme a généré des problèmes difficiles à résoudre pour le CNES nécessitant des évolutions majeures du concept même de satellite ainsi que de la technologie qui la sous-tendait, de l'organisation du travail (notamment la gestion des projets), et de la théorie de l'action des acteurs parties prenantes.

Quelques exemples d'exigences qui ont orienté les concepteurs des satellites du programme Myriade :

- E1 : masse du satellite < 120 kg (contre plusieurs tonnes pour les « satellites classiques »)
- E2 : volume du satellite < 1 m³ (contre plusieurs dizaines de m³ pour les « satellites classiques »)
- E3 : puissance embarquée 100 W (ce qui nécessite des arbitrages serrés entre la charge utile et les sous-systèmes de la plateforme)
- E4 : coût de revient < 3 millions d'Euros (contre plusieurs centaines de millions d'euros pour les « satellites classiques »)
- E5 : délai de réalisation = 2 ans (contre une dizaine d'année pour les « satellites classiques »)
- E6 : utilisation de composants adaptés du secteur non spatial (les composants des « satellites classiques » sont réalisés sur mesure ou adaptés des systèmes militaires).

3.2 Modèle à base de contradictions dans le processus de conception de microsattelites

Le concept de contradiction constitue un élément invariant permettant de modéliser le processus de conception innovant tel que celui des micro-satellites du CNES. De manière générale, 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 parviendront à résoudre le système d'exigences grâce à un arbitrage ou en dépassant une contradiction. 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 3).

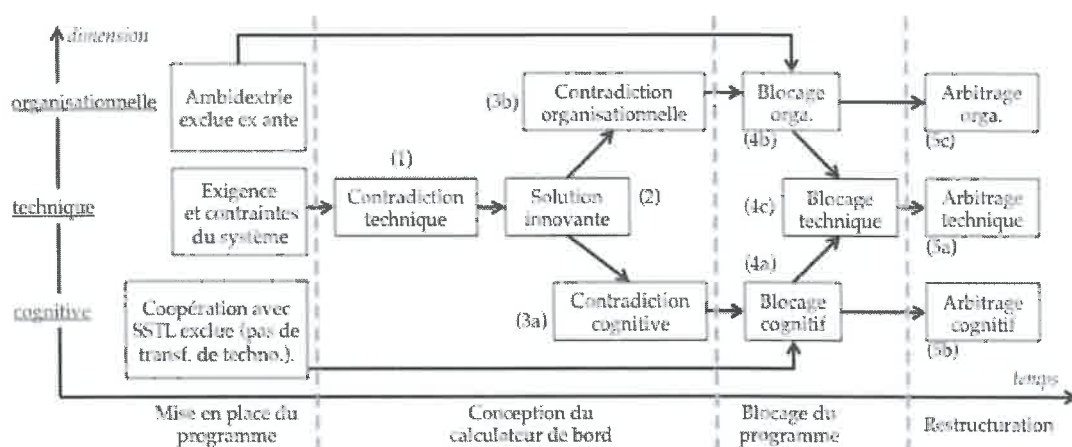


Figure 3 : Cheminement de contradictions techniques – cognitives – organisationnelles.

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 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 soutient, 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 microsattellites, 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).

Ce 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 l'échec relatif du projet (une innovation incrémentale à la place d'une innovation radicale).

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

4. Généralisation

L'IS est essentiellement présentée dans la littérature comme une démarche de réalisation des compromis entre exigences et contraintes, lorsque le problème est non seulement complexe à résoudre mais également difficile à définir (cf. plus haut). La résolution d'un problème implique parfois, comme dans le cas Myriade, le dépassement de contradictions. Or, la résolution des problèmes par dépassement de contradictions est de nature fondamentalement différente de celle visant un compromis. Dans le premier cas, on s'oriente souvent vers une solution de rupture, alors que dans le second on tente d'optimiser les compétences acquises. Plus précisément, le dépassement de contradictions implique le développement de nouveaux concepts, de nouvelles technologies, afin d'aboutir à un nouveau cadre, un nouvel espace de solution, dans lequel il devient possible de concilier les exigences contradictoires.

Compromis et dépassement de contradictions sont donc des choix stratégiques du projet de conception. Ils doivent tous les deux être pris en compte dans le modèle d'analyse du projet. Pour expliquer ce comportement, nous proposons un modèle sous forme de diagramme d'activités UML (Figure 4).

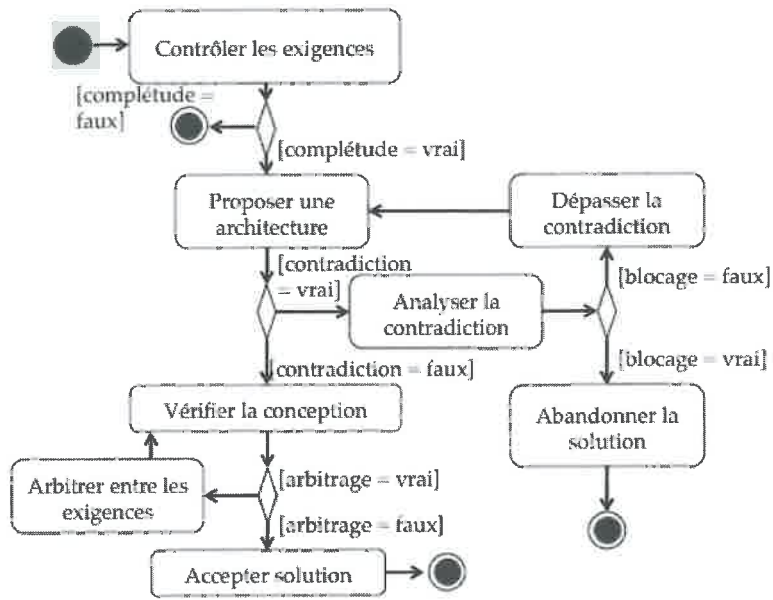


Figure 4 : Modèle d’analyse d’exigences et des contradictions.

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 est à l’origine de tensions créatrices, comme le montre Altshuller (1984) au travers de la méthode TRIZ. On aboutit alors à une solution de type innovation radicale, qui surmonte ces 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.

Comme l’a mis en évidence notre étude de cas, les contradictions ne sont pas seulement de nature technique mais également de nature cognitive et organisationnelle et il existe une forte interaction entre les trois dimensions. En effet, lorsque l’on réussit à dépasser une contradiction technique grâce au développement d’une technologie nouvelle, les connaissances nouvellement

généérées sont susceptibles d'entrer en conflit avec les représentations des acteurs. La résolution technique d'un problème peut aboutir à la génération d'une contradiction cognitive et/ou organisationnelle. Dans notre étude de cas, c'est par la résolution du problème technique du calculateur (diminuer la masse et augmenter la capacité de calcul) qu'a émergé la contradiction cognitive entre deux visions : « *Smaller Faster Better Cheaper* » et « *Mission Success First* », cette dernière correspondant aux représentations des ingénieurs seniors du CNES. Plus les solutions techniques sont audacieuses plus la gestion des conflits de représentations s'avère problématique.

Enfin le modèle de gestion de projet de l'IS théorisée dans le cycle en V porte selon nous une contradiction organisationnelle en son propre sein. En effet, il nous semble que les qualités requises pour une organisation capable de mener à bien le processus séquentiel de décomposition du problème puis d'intégration et validation de la solution sont celles d'une bureaucratie. Alors qu'à l'inverse, la maîtrise des interactions entre les phases qui permettent de faire évoluer les exigences tout au long du projet de conception nécessite plutôt les qualités d'une petite structure organique. Par conséquent, les organisations qui sont performantes pour résoudre les problèmes complexes en maîtrisant parfaitement la démarche séquentielle, telle que le CNES, sont souvent moins performantes lorsqu'elles sont confrontées à un problème difficile à formuler dans la mesure où elles maîtrisent moins bien les mécanismes de coordination transversaux du cycle en V.

Idéalement la maîtrise du cycle en V tel que le préconise l'IS implique que l'organisation dispose de caractéristiques d'ambidextrie. Elle doit être en mesure de dépasser une contradiction organisationnelle lui permettant à la fois d'être performant en exploration des solutions nouvelles et dans l'exploitation de compétences acquises.

5. Conclusion

Si on exclut les problèmes triviaux, qui sont des problèmes simples, déjà résolus, on constate selon la typologie ci-dessous qu'il subsiste trois classes de problèmes nécessitant une maîtrise différenciée des processus de résolution (Figure 5).

Ainsi la résolution des problèmes de type 1 implique la capacité à maîtriser les étapes séquentielles visant à décomposer le problème et à intégrer puis valider la solution. Les grandes structures hiérarchiques et bureaucratiques telle que le CNES ont prouvées par le passé leur capacité à maîtriser de tels processus.

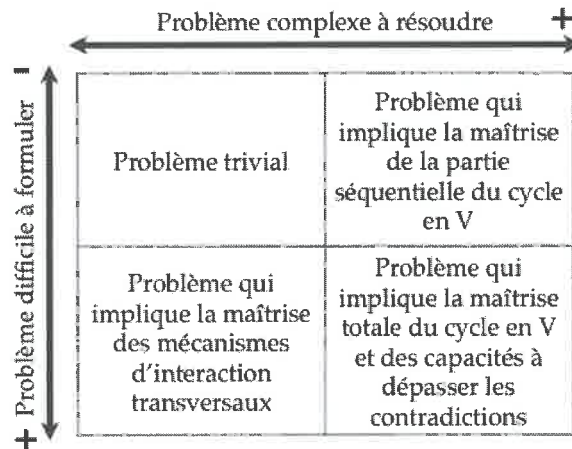


Figure 5 : Typologie de problèmes à résoudre.

Le problème de type 2 nécessite plutôt une capacité à maîtriser les mécanismes transversaux de coordination du cycle en V visant à permettre aux acteurs de converger vers une représentation commune du problème à résoudre. Les structures adhocratiques favorisant les ajustements mutuels entre les acteurs sont les mieux armées pour la résolution de tels problèmes. Par ailleurs, le vrai défi de l'IS concerne la résolution des problèmes de type 3.

L'atteinte d'un tel objectif implique une capacité à maîtriser l'ensemble du cycle en V, l'organisation développant alors des capacités d'ambidextrie. En effet, cette dernière devrait simultanément résoudre certains problèmes par arbitrage, tout autant que dépasser des contradictions. Une telle configuration nécessite que l'on fournisse aux concepteurs les moyens d'évaluer les enjeux liés aux options d'arbitrages, ou de dépassements de contradiction.

6. Bibliographie

- 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*, New York: Gordon and Breach Publishers.
- Belleval, C. et Lerch, C., (2010), "L'Innovation Envisagée comme un Processus de Résolutions de Contradictions Techniques, Organisationnelles et Cognitives", Article de recherche du laboratoire BETA.
- Clark K., Fujimoto T., (1991), *Product development performance: strategy, organization and management in the world auto industry*, Harvard Business School Press, Boston.
- CNES, (1998), *Dossier de Programme Microsatellites*. Paris: Document interne.
- Cohen, M., March, J. et Olsen, J., (1972), "A garbage can model of organizational choice", *Administrative Science Quarterly* n°17/1, pp. 1-25.

- Cross, N., (2001), *Engineering design methods - Strategies for product development*, 3rd edition, John Wiley & Sons.
- Le Masson, P., Weil, B. et 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.
- Meinadier, J.P., (1998), *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermes.
- Newel, A. (1969), "Heuristic programming: ill structured problems", in Aronovsky, J. (Ed.), *Progress in operations research*, New York: Wiley.
- Nightingale, P., (2000), "The product-process-organisation relationship in complex development projects", *Research Policy*, n° 29, pp. 913-930.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen J. et Grote, K.H., (2007), *Engineering Design, A Systematic Approach*, 3rd Edition, Springer.
- Reitman, W. R. (1964), "Heuristic Decision Procedures, Open Constraints and the Structure of Ill-Defined Problems", in Shelley, M. W. et G. L. Bryan (Eds.), *Human Judgments and Optimality*, pp. 282-315, New York, Wiley.
- Sanchez, R. et Mahoney, J. (1996). *Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design*, *Strategic Management Journal*, n° 17, (Special Issue: Knowledge and the Firm), pp. 63-76.
- Simon, A.H., (1969), *The science of the artificial*, MIT Press Cambridge MA, USA.
- Simon, H.A. (1962), "The Architecture of Complexity", *Proceedings of the American Philosophical Society*, n° 106/6, pp.467-482.
- Simon, H. A. (1973), "The structure of ill structured problems", *Artificial Intelligence*, n°4, pp.181-201.
- Suh, N. P., (2005), "Complexity in Engineering", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, n°54/2, pp. 46-63.
- Tushman, M. and O'Reilly III, C., (1996), "Ambidextrous organizations: managing evolutionary and revolutionary change", *California Management Review*, n° 38/4, pp. 8-30.
- Valerdi, R., Davidz, H.L., (2009), "Empirical Research in System Engineering: Challenges and Opportunities of a New Frontier", *System Engineering*, vol.12/2, pp.169-181.
- Visser, W., (1992), "Raisonnement analogique et conception créative : études empiriques de trois projets de conception", *01'Design*, 25-27 janvier, Marrakech.