

# Petit guide pour grands projets

par Philippe COUILLARD

Toute ma carrière, j'ai participé à de grands projets. Ils étaient tous dans le domaine spatial et, pour beaucoup, ils concernaient des nouveautés technologiques jamais réalisées auparavant en Europe. C'est ce que j'appelle des projets « premiers de cordée ».

J'étais responsable « système » sur le projet de lanceur Ariane 1, chef de projet du satellite SPOT 1, directeur de programme (cela fait plus riche que chef de projet mais c'est pareil !) de l'avion spatial Hermes. J'ai eu un rôle de supervision pour des projets de satellites : Telecom 1, TVSAT/TDF1, Turksat 1 qui a été ma première expérience de commerce à l'export... J'ai contribué au développement du cargo qui a desservi la station spatiale internationale l'ATV (Automatic Transfert Vehicule) et j'ai négocié comme industriel maître d'œuvre le contrat de développement du missile balistique M51 avec la Délégation Générale de l'Armement.

Toutes ces activités, outre qu'elles ont été passionnantes, m'ont apporté de l'expérience. Ce petit guide n'a pas d'autre ambition que de faire part de cette expérience pour aider, dans la mesure du possible, les générations qui suivent à s'y prendre encore mieux. J'ai bien conscience que chaque projet a des caractéristiques et des contraintes particulières, mais je suis persuadé qu'il existe aussi des traits communs. Je sais aussi que les techniques ont considérablement évolué avec notamment l'apport du numérique (outils de simulation, outils de gestion financiers ou calendaires...). Mais j'ai la faiblesse de croire que la conduite des projets repose d'abord sur les hommes qui les entreprennent et l'organisation qu'ils mettent en place pour les réaliser. C'est ce que je cherche à faire ressortir. Je pense que cela peut être utile non seulement aux hommes de projet, mais aussi à ceux qui les décident et les financent.

Le plan du guide est le suivant :

1. Qu'est-ce qu'un projet ?
2. Avant le projet
3. L'organisation
4. Les contrats
5. Les spécifications techniques
6. Les revues, points d'étape et points clés
7. La gestion de la définition technique
8. La gestion des délais
9. La gestion des coûts
10. Les essais

## 1. Qu'est-ce qu'un projet?

Un **projet** est un ensemble d'activités qui conduisent à développer, qualifier et exploiter un **système** et qui répond aux définitions suivantes :

- il correspond à une mission déterminée, correctement définie
- les phases de développement puis de production (véhicules) ou d'exploitation (infrastructures) s'inscrivent dans un calendrier donné
- chacune de ces phases correspond à une enveloppe budgétaire donnée
- il est soumis, éventuellement, à des contraintes « politiques »

### ***Qu'est-ce qu'un système ?***

On utilise le mot système de différentes façons : un système de pensée, le système métrique, le système solaire... Il y a même le système D ... (comme Débrouille ou Dém....)

Dans ce guide, par système, nous comprenons un ensemble complexe d'éléments et de dispositifs mis en œuvre pour aboutir à un résultat. Donnons quelques exemples. Les moyens de transport sont des systèmes, qu'ils soient voitures, bateaux, trains, hélicoptères, avions, lanceurs ou satellites. Un réseau de communications ou un réseau de distribution sont aussi des systèmes. Les grandes infrastructures comme les centrales de production d'énergie depuis le barrage hydraulique jusqu'à la centrale nucléaire, mais aussi des ponts ou des tunnels routiers ou ferroviaires sont encore des systèmes.

Attention, en aéronautique, on utilise le mot système pour désigner en fait des sous-systèmes de l'avion comme le système hydraulique ou le système de conditionnement d'air. Dans le milieu spatial, ce seraient des sous-systèmes fonctionnels.

### ***Contraintes politiques:***

Pour les grands projets, il est rare qu'il n'existe pas de contrainte politique. Une des contraintes qui fait couler le plus d'encre dans les projets spatiaux européens est le fameux « retour géographique ». Chaque pays européen apporte son financement à la condition d'obtenir un retour dans l'industrie de son pays à la hauteur de ses efforts financiers. Cela semble logique et naturel pour les projets de développement de véhicules nouveaux, surtout lorsqu'ils n'ont pas de suite commerciale. Je reviendrai sur les effets pervers de cette règle un peu plus loin. A noter que pour les grands projets américains, il existe des contraintes du même type pour assurer une répartition des travaux entre les côtes Est et Ouest, le Texas et autres états. Je ne suis pas très renseigné sur les développements chinois, mais, à première vue, il existe aussi des partages régionaux à satisfaire, entre Shanghai et Pékin notamment.

Mais on peut aussi se servir de ce qui peut apparaître comme des contraintes. Le recours à des financements de plusieurs Etats entraîne la mise en œuvre d'un accord international, soit en direct entre les participants, soit au sein de l'Agence Spatiale Européenne ou de toute autre agence internationale. Ces accords sont pluriannuels et sécurisent beaucoup plus les financements qu'un projet uniquement français dont le parlement décide le financement année après année. Un projet purement français peut être arrêté sine die, pas un projet international. Sur le satellite SPOT, les accords signés avec la Suède et la Belgique, dont les participations étaient de seulement 4% chacune, a contribué à la sécurisation du projet.

## 2. Avant le projet

Le lancement d'un nouveau projet est une affaire délicate. Un nouveau programme naît obligatoirement de la rencontre entre un besoin à satisfaire et des technologies suffisamment développées pour répondre au besoin. Les deux ingrédients, besoin d'une part et technologies suffisamment connues d'autre part, sont nécessaires.

Le besoin peut être de nature commerciale comme le développement d'une meilleure plateforme de satellite de télécommunications plus performante ou meilleur marché. Il peut provenir d'une demande de service public telle une nouvelle génération de satellites de météorologie. Il peut être aussi la conséquence d'une volonté de souveraineté d'un état ou d'un groupe d'états. C'est le cas du lanceur Ariane dont le développement a assuré l'autonomie de l'Europe dans l'accès à l'espace, c'est celui de la station internationale qui a scellé l'entente russo-américaine pour que des hommes résident en orbite basse ou encore celui du vol habité chinois qui démontre le rang de grande puissance de la Chine.

Les technologies qui permettent de prétendre que la mission, issue du besoin, est réalisable, doivent exister à un stade industriel suffisamment avancé. Si tel n'est pas le cas, il est illusoire de vouloir satisfaire la mission. C'est ainsi qu'Ariane 1 qui répondait au besoin de mise en orbite de satellites de télécommunications géostationnaires ne pouvait se réaliser qu'à condition de maîtriser la propulsion cryotechnique, c'est-à-dire à oxygène et hydrogène liquides. Des pré-développements militaires effectués dans les années 60 sur cette propulsion permettaient de prétendre à une maîtrise suffisante.

SPOT, satellite pour l'observation de la Terre doit son existence à la disponibilité de détecteurs CCD (Charge Coupled Device), ligne de détecteurs transformant les photons en charges électriques capables d'être transférées très rapidement et produisant un courant proportionnel à l'éclairement du paysage. Cette même technologie est maintenant employée dans les appareils photo numériques. Les détecteurs du premier SPOT ont été achetés chez un des tous premiers fournisseurs californiens qui les destinait aux fax. Des vols avion avaient permis de conclure à la faisabilité de cette technique, jamais encore employée. En fait elle était déjà employée par l'Union Soviétique mais nous ne le savions pas. Elle ne l'était pas par les satellites civils américains de cette époque.

La précision de localisation obtenue à l'aide des satellites GPS américains ou des satellites européens Galileo repose presque entièrement sur la stabilité des horloges embarquées à bord des satellites (moins d'un milliardième de seconde de retard ou d'avance par an. C'est une précision très impressionnante et très exigeante !). Cette technologie est acquise tant aux Etats-Unis qu'en Europe. Elle l'est même en Russie et en Chine qui ont mis en orbite des moyens similaires, Glonass et Beidou.

Dans le domaine scientifique, les résultats collectés par les satellites dépendent directement des technologies accessibles à leurs instruments.

La décision de lancement d'un nouveau programme est l'aboutissement d'un processus assez long et souvent délicat que nous allons essayer d'analyser. Il comporte des études de faisabilité technique, bien entendu, mais aussi la mise en place de toutes les données programmatiques. Il faut définir l'organisation, celle du client, celle du ou des fournisseurs. Il faut présenter le devis financier à respecter. Il convient aussi d'indiquer le calendrier des travaux. Enfin, il est très utile d'analyser les risques de l'aventure dans laquelle on se lance.

En plus de toutes ces choses, la décision a peu de chance de se prendre sans une bonne dose de lobbying vis-à-vis des décideurs et de ceux qui vont financer le projet. Compte tenu des sommes engagées et des risques, de nombreux acteurs participent à la décision et il est finalement normal de les informer des enjeux, si cela a du sens du « business model », des motivations et des risques.

## Les études de faisabilité

Ce sont des études à caractère « système », obligatoirement pluridisciplinaires, qui doivent démontrer au minimum sur le papier que le système développé répond à la mission définie et a un sens technique. Elles visent à donner au projet considéré des dimensions, une masse si c'est un véhicule, et une architecture dans tous les cas. Elles donnent une description générale des équipements qu'il contient. Elles donnent aussi une première estimation des performances qu'on peut attendre. Sur ces bases, on peut déduire les technologies qui sont nécessaires et suffisantes pour construire le véhicule, recenser celles qui sont bien connues, celles qui sont à approfondir et celles qui sont à développer. Il est bien évident que ces études peuvent être itératives. Elles peuvent modifier les exigences de mission si cela est possible et lorsque les difficultés techniques sont trop grandes.

Donnons quelques exemples :

Au démarrage de la Navette Spatiale américaine, la mission demandait un véhicule entièrement réutilisable permettant l'accès en orbite. Les études ont montré rapidement qu'en fait, il fallait deux étages même avec les performances propulsives les plus optimistes. A noter que même aujourd'hui, les technologies ne permettent toujours pas d'aller en orbite avec un « monoétage » (le programme de démonstration X33 en a fait l'amère démonstration). Dans la première version du Shuttle, il y avait deux étages entièrement récupérables, le « booster » et l'« orbiter ». Le booster avait la taille d'un gros 747. Il avait des moteurs cryotechniques et des ailes épaisses sans flèche. Cette configuration avec deux avions superposés était très onéreuse. Dans la version retenue, le booster a totalement disparu et a été remplacé par deux étages à propulsion solide, qu'on a appelés aussi « boosters », et qui n'étaient que très partiellement réutilisables.

Sur le satellite SPOT, la première version comportait deux instruments différents, l'un dans le visible avec une résolution de 20 m, l'autre dans l'infrarouge avec une résolution d'une centaine de mètres. Après les études de faisabilité et pour des raisons techniques mais aussi pour réduire les coûts de développement, le CNES a fait le choix d'un seul instrument dans le visible, avec toutefois une résolution très améliorée pour l'époque (10 m) et a retenu un satellite emportant deux de ces instruments doublant ainsi la rapidité de couverture. L'instrument infrarouge a été abandonné.

Sur l'avion spatial Hermes, les études de faisabilité ont conduit à définir la taille de l'équipage transporté, la masse de fret, les possibilités de manœuvres orbitales et d'amarrage... Elles ont mis en lumière les technologies délicates à mettre en œuvre et qui n'étaient pas maîtrisées en Europe, comme les piles à combustible et le bouclier de protection thermique de rentrée.

Enfin, dans certains cas, ces études ont amené à abandonner au moins provisoirement le développement projeté parce que les technologies ne le permettent pas. Le besoin d'un satellite d'observation haute résolution à vision permanente de la zone observée, donc en orbite géostationnaire à 36.000 Km, existe mais la technologie d'un tel satellite est encore hors de portée. Le télescope de résolution métrique à 36.000 Km d'altitude reste dans le domaine du rêve pour le moment ! Les satellites d'observation restent sur des orbites basses.

La captation de l'énergie solaire en orbite et son transport vers le sol serait certainement une solution appréciable pour résoudre nos problèmes énergétiques, mais la technologie du transport de puissance sans fil depuis des orbites, n'est pas suffisamment maîtrisée actuellement pour que cette mission puisse être satisfaite. Il est possible que dans un certain temps, la faisabilité de ces missions apparaisse. C'est pourquoi il est bon de temps en temps de confronter l'état des technologies à ces missions potentielles.

Pour les technologies nouvelles, l'idéal est de pouvoir financer des démonstrations en parallèle des études de faisabilité, c'est-à-dire avant de commencer la phase de développement dont les flux financiers sont d'un ordre de grandeur bien plus important qu'une phase de faisabilité. Cette approche s'est largement pratiquée au début de l'aventure spatiale et encore plus au moment où les Etats ont développé des engins balistiques précurseurs de fait des lanceurs spatiaux. Toute la série des fusées-sondes ainsi que le lanceur Diamant A ont été des démonstrateurs technologiques, financés par le développement des missiles de la force de dissuasion, qui ont permis à la France de se voir attribuée ultérieurement la maîtrise d'œuvre de la famille des lanceurs Ariane.

Malheureusement, la réalité s'écarte souvent de l'idéal pour différentes raisons. La raison la plus fréquente est qu'on hésite à dépenser dans des démonstrations technologiques des sommes qui peuvent être importantes alors que la décision de programme n'est pas prise. C'est un véritable cercle vicieux : pas de budget sans décision de programme, mais pas de décision sans minimiser les risques technologiques et cette réduction de risque requiert du budget ! De façon à casser ce cercle, la plupart du temps on est conduit à faire des impasses. Ce ne serait pas très ennuyeux si, conscient d'avoir fait une impasse, on conduisait des actions en réduction de risques dès le début de la décision de programme obtenue. Mais souvent, dans le feu des argumentaires pour défendre le programme, devant les contraintes budgétaires et les concessions faites pour obtenir la décision, on arrive à se persuader qu'après tout la technologie est « légèrement risquée » mais pas aussi immature qu'on le prétend. Dans ce cas, il est rare qu'au cours du développement, le problème ne resurgisse pas et alors il est évident qu'on le paie au tarif fort puisque, d'une part, il faut des efforts importants pour résoudre un problème posé dans l'urgence et, d'autre part, cette résolution met en retard tout le reste du programme au moment où les flux de dépenses sont élevés. Sur le programme TVSAT/TDF1, on avait sous-estimé la difficulté d'obtenir des tubes à ondes progressives de forte puissance (250Watts environ). Il a fallu faire face à ce problème en pleine phase de développement. Il n'a d'ailleurs jamais été bien résolu sur TDF1 !

### ***Intérêt des démonstrateurs technologiques***

Je distingue deux sortes de démonstrateurs technologiques. Des démonstrateurs développés au sein d'un projet décidé et ceux qui se placent en dehors d'une décision de projet.

Pour la première catégorie, l'inconvénient d'un démonstrateur technologique est d'engendrer des dépenses importantes et d'accaparer des ressources significatives au détriment possible du but final du projet.

Lors du développement du lanceur lunaire Apollo V, les Américains se sont posé la question de savoir s'ils devaient tester étage par étage par étapes progressives. Après études, ils ont estimé que le calendrier du développement dériverait totalement et que les coûts du projet s'envoleraient. Le chef de projet Georges Müller, prit la décision courageuse de ne tester ce lanceur qu'avec tous ses étages et l'avenir lui a donné raison. Au début d'Ariane 1, nous avons eu au CNES la même tentation : tester d'abord le bi-étage supérieur puis le lanceur complet. Nous avons abouti au même résultat. De plus, nous avons mis en avant que la configuration du deuxième étage tiré du sol présentait un grand nombre de différences avec un étage allumé en altitude.

Proposer un démonstrateur associé à un financement élevé, c'est le risque de voir le programme être repoussé ou se réduire au démonstrateur lui-même. Le programme de démonstration peut tuer le programme lui-même. Dans le cadre du programme Hermes, c'était le dilemme du démonstrateur de rentrée Maia que proposait Dassault Aviation. Le risque était évident que si on décidait Maia, Hermes serait repoussé, voire même annulé. Le CNES était conscient de ce danger et, pour cette raison ne voulait pas de ce démonstrateur. Mais l'affaire fût longuement débattue, car c'était l'intérêt évident de Dassault Aviation d'obtenir ce démonstrateur. Il en aurait été le maître d'œuvre et aurait alors repoussé le rôle

d'Aérospatiale dont la maîtrise d'œuvre lui avait été imposée. Bien entendu, Aérospatiale était farouchement opposée à cette idée de démonstrateur. En définitive, le programme Hermes sans démonstrateur préalable a été abandonné. Si le démonstrateur Maia seul l'avait été, l'Europe n'aurait pas démontré sa capacité dans le vol habité qui était son véritable objectif. Dans cet exemple, on voit s'immiscer des aspects de politique industrielle au milieu de considérations purement techniques. C'est aussi cela la réalité. Tous les aspects s'entrecroisent dans une décision de programme.

Mais il existe une autre espèce de démonstrateurs, ceux qui sont décidés en amont des projets qu'on pourrait qualifier d'opérationnels. Ils ont une double fonction. D'une part, ils font avancer les technologies en réalisant des systèmes concrets. On peut tester des technologies par morceaux, mais dans les systèmes où les différents éléments interagissent très fortement les uns sur les autres, il est très rassurant de bâtir des systèmes complets.

D'autre part, ils ont le mérite de donner du « grain à moudre » à des bureaux d'études au savoir-faire très pointu et de les tenir en bonne forme. Les exemples sont multiples où faute de développements nouveaux les équipes perdent leur savoir. L'expérience a toujours du mal à passer d'une génération à une autre s'il n'y a pas de problèmes réels à résoudre. Les militaires l'ont bien compris et ils savent qu'ils doivent entretenir l'expertise des équipes de développements, s'ils veulent compter sur elles au moment où ils engagent de nouveaux programmes.

Depuis la fin du développement de l'Airbus A350, il n'y a plus de programmes d'avions commerciaux entièrement nouveaux. Il y a des améliorations avec les projets « NEO ». Mais, dans un certain temps, lorsqu'on voudra faire un saut technologique pour une aviation plus verte par exemple, on risque de manquer de compétences pour réaliser un projet d'avion différent. Cela plaide pour le développement de démonstrateurs qui font avancer les techniques en attendant la décision de l'avion de nouvelle génération dont on ne connaît pas encore l'architecture mais dont on a déjà identifié certaines technologies innovantes. Et dans un avion tous les éléments interagissent les uns sur les autres et seul un système complet à l'échelle 1 permet de conclure à la faisabilité. N'oublions pas d'ailleurs que certains pays financent en secret ce type de démonstrateurs : ce sont les « blacks programs » chers aux américains et leurs industriels en bénéficient pour faire ultérieurement la différence avec leurs concurrents.

## **L'établissement des devis**

Déterminer l'enveloppe financière d'un programme nouveau est un exercice difficile. Si le programme comporte beaucoup de nouveautés, on manque de références et de repères. Même dans le cas de programmes plus classiques, les comparaisons avec d'autres programmes ne sont jamais évidentes. Si l'on compare deux étages à propulsion solide, l'un militaire, l'autre civil, on s'aperçoit vite que les exigences sont très loin d'être communes. La durée de vie est extrêmement longue pour le militaire par rapport au besoin civil. Les exigences de fiabilité, de résistance à certaines agressions sont totalement différentes. On est conduit à utiliser des propergols différents, etc ... Il est évident qu'à des spécifications différentes, on aboutit à des définitions différentes et des coûts de développement et de production différents.

L'établissement d'un bon devis suppose que l'on ait une maîtrise suffisante de la définition de ce que l'on veut fabriquer. Il faut, en effet, être capable de décomposer le produit à fabriquer en ses divers constituants de façon suffisamment détaillée pour être capable d'estimer les coûts de tous leurs développements. Pour réussir cet exercice, il est utile de bâtir dès cette étape, l'Organigramme Technique (OT) du programme (en anglais le Work Breakdown Structure ou WBS). C'est une méthode qu'on décrira au chapitre suivant et qui répertorie les diverses composantes d'un projet et y associe le répertoire des tâches qui sont

réalisées pour le développement de chaque composante : travaux d'ingénierie, de fabrication, d'essais, de qualité, etc... Le responsable du futur développement, le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre, peut alors pour chacune des composantes faire une estimation s'il en a une connaissance suffisante ou consulter une entreprise spécialisée dans cette composante, ou encore organiser une compétition entre des entreprises capables de développer et produire cette composante. Attention toutefois au degré de « granulométrie » utilisé, car plus une facture comporte de lignes, plus elle a vocation à être onéreuse sans autre raison qu'à un surcoût dû au foisonnement. Il faudra alors sommer toutes les propositions reçues en ajoutant les travaux et essais d'assemblage des composantes qui conduisent au produit final. Cela suppose aussi d'avoir défini avec suffisamment de précision la logique de développement, c'est-à-dire l'enchaînement des travaux de développement et la définition des essais de mises au point et de qualification qui ont été retenus. Disposer d'une logique de développement bien définie est essentiel à l'établissement d'un devis. Ce n'est certainement pas la même enveloppe budgétaire pour un programme qui se termine par dix essais en vol et pour celui qui n'en prévoit que quatre. La nature et le nombre des modèles de développement, la définition des essais à conduire sur ces modèles doivent être définis sans ambiguïté, en comparant s'il le faut différentes stratégies, de façon à chiffrer au mieux le coût d'un programme. L'ensemble de la logique de développement doit aussi être mise en perspective au sein du calendrier de développement du programme.

Le niveau de crédibilité de l'enveloppe financière ainsi déterminée dépend de nombreux facteurs :

- d'abord, il dépend de la profondeur des études préliminaires qui ont pu être menées et du degré de novation du projet envisagé. Un projet, jugé « classique », parce qu'il reprend largement des développements menés sur des projets antérieurs est plus facile à chiffrer qu'un projet qui constitue une première pour ceux qui l'entreprennent. La solidité de l'estimation est incontestablement meilleure dans le premier cas. Si on peut se placer dans ce cas de figure, il ne faut surtout pas hésiter à le faire. Dans le cadre d'un projet de développement, il ne faut jamais inventer pour le plaisir. Les inventions sont des affaires de recherche... Les programmes aéronautiques sont parvenus à l'adoption systématique de cette approche en s'appuyant sur le concept de « Technology Readiness Levels (TRL) » qui identifient plusieurs degrés de maturité des technologies candidates. Ils appliquent aussi largement la politique des petits pas d'un programme à l'autre, non seulement pour sécuriser les coûts de développement, mais aussi pour minimiser les risques techniques, les deux étant fortement liés. Mais peut-être que dans le futur, l'aéronautique devra réaliser un grand pas, alors les risques seront plus élevés.

- Ensuite, elle dépend de la nature des consultations industrielles qui ont été faites. Ces consultations étaient-elles engageantes ou seulement des estimations ? Si elles sont engageantes, il est fort à parier que les réponses sont des coûts maxima, car elles contiennent des marges de négociation. Si elles ne le sont pas, il est à craindre que les prix aient été minimisés pour s'assurer de rester dans la sélection. Y a-t-il eu compétition ou non ? A première vue, on pourrait penser qu'il est toujours préférable d'organiser des compétitions. C'est souvent vrai, mais d'une part, ce n'est pas toujours possible (il n'y a pas toujours les savoir-faire dans deux équipes différentes, parce que le marché ne permet pas à deux équipes de vivre en parallèle) et, d'autre part, la compétition sur des sujets très nouveaux peut entraîner des prises de risques insensées pour gagner (une fois choisi, s'il sait que son produit est indispensable à la réussite du programme, le compétiteur sait que le programme devra l'assister sous peine de renoncement). De véritables compétitions sont aussi longues à organiser pour qu'elles soient engageantes et si elles ne sont pas engageantes, elles n'offrent pas beaucoup plus d'intérêt que des consultations directes. Il n'est donc pas toujours possible de mener des compétitions de manière satisfaisante.

Quel que soit la précision du devis établi, il y a toujours une certaine incertitude sur le coût de développement d'un véhicule nouveau. La règle adoptée par la Convention de l'Agence

Spatiale Européenne, stipule qu'un pays adhérent à un programme ne peut se désengager tant que l'enveloppe financière à terminaison reste inférieure à 120% de la prévision initiale. Certains voudraient réduire, voire même supprimer cette marge. C'est, à mon avis, dangereux non seulement sur les projets à forte composante innovatrice mais aussi sur les autres car l'expérience montre que ce ne sont pas forcément les programmes les plus ambitieux qui présentent les plus forts dépassements en fin de développement. Dans les années 50-60, les militaires américains avaient calculé le rapport du coût final au coût initial de leurs grands programmes de défense et ils avaient constaté un rapport égal à 3,14, c'est-à-dire  $\pi$ . Nous n'en sommes plus là, mais il n'est tout de même pas rare de constater des coefficients supérieurs à 1,2 sur certains programmes de l'ESA. Pour tous les programmes qu'ils comportent des avancées techniques ou non, je conseille de maintenir la valeur de 120%.

Cette marge de programme doit être gérée au plus haut niveau de l'organisation. Si la marge est répartie à l'avance entre les acteurs, il est à craindre que les acteurs adoptent ce qu'on peut appeler une démarche « budgétaire », c'est-à-dire que chacun fasse de son mieux pour dépenser tout ce qui lui est permis. Au contraire si la marge est gérée par la plus haute autorité du programme, elle sera prioritairement employée à résoudre les difficultés réelles du programme.

Il faut être conscient aussi que beaucoup d'indécisions au démarrage d'un programme sont très coûteuses. On pourrait penser que ces délais supplémentaires sont mis à profit pour parfaire les technologies les plus critiques ou approfondir les études du système. C'est rarement le cas et très fréquemment, on est amené à maintenir l'arme au pied tout l'ensemble des industriels participants, ne serait-ce que pour qu'ils continuent à défendre le programme, et les coûts se mettent à croître. Le programme préparatoire au satellite d'observation Helios qui s'appelait SAMRO, a coûté à peu près autant que tout le développement du satellite SPOT 1 !

Outre la détermination de l'enveloppe globale d'un programme, de ce que l'on appelle aussi son coût à achèvement, on se doit de fournir aux décideurs l'échéancier des dépenses. Les programmes spatiaux s'étendent sur plusieurs années, de trois à huit ans très généralement, et en conséquence cet échéancier est très important, mais il n'est pas plus simple à déterminer que le coût global. Il y a deux positions assez irréconciliables dans ce domaine. Celle des techniciens pour qui les flux financiers suivent la logique des travaux et le nombre d'intervenants variable au cours du programme (au démarrage, montée en puissance avec une forte pente ; puis pic d'activités avec des travaux à tous les niveaux système, sous-systèmes et équipements en parallèle ; enfin assemblages et intégrations avec une décroissance des effectifs) et celle des financiers qui aimeraient que les flux de dépenses soient très plats voire plutôt situés vers la fin du développement. La réalité est qu'on ne démarre jamais aussi vite que ce que pensent les techniciens. Il y a toujours un certain traînage à la mise en route. Mais, il y a toujours un pic de dépense inévitable et beaucoup de difficultés à faire redescendre la courbe d'activité, parce qu'il y a toujours de fortes inerties dans la réduction des effectifs. Enfin, une répartition trop constante des flux de dépenses conduit inévitablement à un étalement du programme et à un renchérissement de son coût à achèvement. Tout se paye !

La règle du juste retour de chaque pays européens fait-elle croître les prix des développements spatiaux ? J'aurais tendance à répondre : oui, un peu. On assiste en effet à une spécialisation de certains pays qui ont un taux de participation ajusté à leur spécialité. Par exemple, la participation belge est traditionnellement centrée sur l'électronique de régulation et de distribution du courant électrique produit par le générateur solaire du satellite à développer. Il en résulte qu'un savoir-faire s'est accumulé dans l'industrie belge. Cela conduit à un monopole européen pour ces équipements. Le prix de ces fournitures ne résulte plus de négociations classiques entre client et fournisseur, mais est fixé par la participation financière au projet qui a été décidée par le gouvernement belge. En phase de



développement, le surcoût éventuel n'est pas déterminant puisque ce qui compte, c'est d'assurer le financement. Par contre lorsqu'il y a production de série, même limitée à quelques dizaines d'exemplaires, ce monopole devient un obstacle clair à la baisse des prix. C'est la raison pour laquelle les maîtres d'œuvre industriels sont souvent amenés à relancer des compétitions ou à rapatrier chez eux la fabrication. Sur les satellites de télécommunications vendus à l'export, on a assisté de façon spectaculaire à ce phénomène de rapatriement chez les maîtres d'œuvre. Cela est dû en partie aux fusions industrielles nombreuses qui se sont produites et en partie à une répartition de la prise de risque sur une part plus importante du produit. Au début des années 90, la part du maître d'œuvre était inférieure à 20%. Comment assurer les risques à l'export sur une part aussi étroite ? Elle est passée à pratiquement 70% aujourd'hui. En ce qui concerne les lanceurs, la société Space X prétend qu'elle obtient ses prix compétitifs parce qu'elle fabrique presque tout en interne et, en plus, sur le même site. Cette explication ne saurait expliquer à elle seule les écarts de prix, mais elle contient sans doute une part de vérité !

Pour les grands projets où l'on a besoin de la contribution de tous les pays, la règle du juste retour interdit pratiquement les compétitions au niveau de la maîtrise d'œuvre. Je m'explique. Sur le projet d'avion spatial Hermes, le CNES avait, dans un premier temps, mis en compétition Aerospatiale et Dassault Aviation. Très rapidement, on s'est aperçu et il n'y avait là rien d'anormal, que les deux concurrents constituaient des équipes européennes avec des répartitions des participations entre les pays différentes et non conformes avec le souhait de participation des états européens. La compétition a été arrêtée très rapidement et le processus de choix a été accéléré. Ceci a abouti à la mise en place d'une maîtrise d'œuvre partagée. Aerospatiale était maître d'œuvre et Dassault Aviation maître d'œuvre associé pour l'aéronautique. C'était un peu compliqué mais il n'y avait plus qu'une équipe et on pouvait réconcilier la répartition industrielle et les participations. Juste pour l'anecdote, je me suis rendu compte un peu après que la même politique industrielle avait été appliquée sur le projet soviétique de navette spatiale Buran. Le maître d'œuvre était la société Energya, celle qui a conçu Soyouz et le vol habité soviétique et le maître d'œuvre associé pour l'aéronautique était la société Molnya responsable de l'engin en dessous de 20 Km d'altitude. Le projet de navigation par satellites Galileo est un projet de l'Union Européenne. Celle-ci a pour principe la mise en concurrence. C'est ce qu'elle a fait pour le développement du système. Deux consortiums industriels se sont constitués en Europe et ont fait des offres. Mais là encore, la Commission s'est rendu compte que les répartitions des financements dans chacune des offres ne collaient pas avec les financements proposés par les Etats. Elle a fini par demander aux deux consortiums de fusionner et de refaire une offre, moins élevée en prix pour justifier son revirement. Ceci fut fait. Le maître d'œuvre ainsi constitué ne courait pas grand risque puisqu'il était finalement en position de monopole. Il faudra bien que la Commission Européenne comprenne qu'à l'avenir la règle du juste retour, seule acceptable pour obtenir les financements des Etats, engendre des contraintes.

## **L'évaluation des risques**

Tout programme de développement comporte des risques et il est bien évident que les risques sont d'autant plus élevés que le programme contient d'importantes nouveautés technologiques. Les risques sont aussi très élevés lorsque les développements préliminaires ont été réduits au plus juste.

Quelle que soit la situation, l'analyse des risques au démarrage d'un programme est une donnée essentielle, non pas à destination des décideurs qui pourraient y trouver de bons prétextes pour ne pas décider, mais pour les responsables du programme de façon à ce qu'ils disposent d'une vision claire de la situation et qu'ils puissent mettre en œuvre une politique de réduction des risques la plus efficace possible. L'analyse des risques n'a en fait d'intérêt que pour déterminer les actions en réduction de risques. Face aux risques les plus

importants, il est souvent utile de prévoir une solution de secours développée en parallèle de la solution nominale. Cela conduit bien sûr à une augmentation des coûts, mais si le risque devient avéré, c'est une solution qui se révèle tout de même moins coûteuse que de mettre tout le programme en retard pour un temps indéfini. Par exemple, sur le programme d'avion spatial Hermes, il était évident que le développement des piles à combustibles était à risque (aucun industriel européen n'avait développé à l'époque ce type de produit). La mise en place de solutions de secours, soit un autre développeur de piles, soit une source d'énergie différente s'imposait. On aurait pu classer aussi dans la catégorie à haut risque le développement de tout le bouclier thermique de rentrée, mais dans ce cas, il était difficile de confier à deux équipes la conduite de développements parallèles. En plus, cela aurait été très onéreux. Des actions en réduction de risques étaient prévues mais pas sur le bouclier tout entier, sur certains composants seulement.

Il faut être conscient que tout problème technique rencontré alors que la phase de développement d'un programme est lancée à pleine puissance est un drame, parce que le temps nécessaire pour résoudre le problème impacte tous les acteurs par le retard induit et pèse immédiatement sur le coût à achèvement. Un risque technique se transforme aussitôt en un risque calendaire qui entraîne alors un risque financier. C'est ce qui s'est produit lorsque sont apparues, lors du deuxième vol de qualification d'Ariane 1, des instabilités de combustion au niveau de l'injecteur du moteur Viking, ayant entraîné l'échec de ce vol puis nécessitant une longue campagne d'essais au sol pour modifier la fabrication et la recette de cet élément majeur du système propulsif. A noter qu'un risque calendaire, c'est-à-dire une dérive des délais de livraison peut se produire sans qu'il y ait de problème technique important, mais toute une série de petits ennuis ou d'erreurs de management. Ces difficultés impactent aussi les coûts et d'autant plus que les ennuis sur un élément se répercutent sur de nombreux travaux extérieurs à cet élément. Cela montre à l'évidence qu'il faut observer de près toute dérive anormale et réagir au plus vite de façon à minimiser les impacts sur le déroulement général du programme. L'analyse des risques et l'établissement d'un plan d'actions en réduction de risques ne peuvent supprimer tous les aléas. Cela relève alors des marges financières et calendaires prises par le projet. Les aléas les plus classiques qu'on rencontre dans les programmes spatiaux sont relatifs à des problèmes de composants (alerte sur certains lots de composants) ou à des mises au point de technologies telles que soudage, brasage, collage,... On se rend bien compte que vu le nombre considérable de composants embarqués à bord d'un satellite (plus du million pour certains) et le nombre tout aussi important de technologies d'assemblages employées, il n'est pas possible d'identifier au départ des actions concrètes de réduction de tous ces risques. A cet égard, nous aborderons plus loin les avantages et les inconvénients de la notion de marché « au forfait » ou en « régie ».

## **La décision de programme**

Des objectifs de mission clairs, une définition technique qui les satisfait, un devis financier crédible, un plan de développement arrêté, une analyse des risques soignée sont tous les arguments à présenter pour une prise de décision. Mais s'ils sont nécessaires, ils ne sont généralement pas suffisants. Pour les grands programmes spatiaux et sans doute pour bien d'autres, il faut en plus avoir un engagement des décideurs politiques, parce que les programmes proposés relèvent fondamentalement du politique. C'était en 1963 que la France et le Royaume-Uni décidaient, au niveau des chefs d'Etats, l'ambitieux

développement de l'avion supersonique Concorde. Ce sont aussi des décisions politiques qui ont été prises au début de l'ère spatiale en plein contexte de guerre froide et qui motivaient Américains et Russes à toujours plus d'exploits. Elle était politique la décision de lancer Spoutnik, d'envoyer Gagarine dans l'Espace en 1961 ou d'aller sur la Lune en 1969. C'était encore en 1973 la volonté du gouvernement français d'entreprendre Ariane, pour assurer l'autonomie de l'Europe dans l'accès à l'espace.

Compte tenu de cet aspect politique des décisions de projet, il est normal que des groupes de pression existent pour ou contre. En France, les grands programmes technologiques et notamment, les grands programmes spatiaux reçoivent très généralement un bon accueil du grand public. Ce n'est pas le cas dans tous les pays européens. L'homme de la rue des pays du Nord de l'Europe est beaucoup plus circonspect sur ces programmes qu'il admire peut-être, mais dont il craint l'effet sur ses impôts. Il faut aussi savoir, même si cela paraît un peu surprenant à première vue, que la communauté scientifique européenne est, en règle générale opposée aux grands programmes spatiaux. Les scientifiques jugent, en gros, que les programmes spatiaux, sauf les programmes purement scientifiques, sont très consommateurs de crédits budgétaires et que tout cet argent serait peut-être mieux employé dans leur propre laboratoire. C'est un peu curieux sachant que les lignes budgétaires sont séparées et que l'abandon d'un programme ne leur a jamais procuré un crédit supplémentaire. L'industrie est bien évidemment un ardent défenseur de ces programmes, mais on notera que ce n'est pas forcément la même industrie dans tous les pays. En France, c'est l'industrie spécialisée dans l'aéronautique qui est le défenseur du spatial, vu comme le prolongement vers des altitudes supérieures des moyens de transport de la troisième dimension. Mais dans d'autres pays, comme l'Allemagne, empêchée de conduire de nouveaux développements aérospatiaux après la Seconde Guerre Mondiale, c'est l'industrie automobile qui s'est tournée vers l'espace parce qu'elle considère que les programmes spatiaux sont des moteurs de développement des technologies nouvelles, payées en grande partie par les Etats et qu'il est bon d'en profiter.

Une décision de programme tient à de très nombreux facteurs, à une stratégie de puissance ou de démonstration de savoir-faire, à des enjeux économiques en tirant l'industrie par les technologies, à des raisons d'augmentation des connaissances et de découvertes passionnantes. L'espace militaire relève bien sûr d'une stratégie de puissance et le vol habité d'une démonstration de savoir-faire. L'exploration du système solaire et l'observation de l'Univers relèvent de notre soif de connaissances.

Une décision de programme peut donc se prendre pour l'une ou l'autre de ces motivations. Suivant les cas, les promoteurs d'un programme s'adressent aux communautés les plus concernées pour expliquer le bien-fondé de leur entreprise, de ses enjeux techniques, politiques ou industriels. Mais, en définitive, ce sont les politiques qui décident en dernier ressort du lancement d'un programme financé par les Etats. L'opinion personnelle des hommes politiques joue alors un rôle déterminant. La vision « gaullienne » du gouvernement du Président Pompidou a incontestablement joué dans la décision d'Ariane en 1973, un temps remise en cause en 1974 par le Président Giscard d'Estaing au moment de sa prise de pouvoir. Bien plus tard, le programme Hermes a reçu à son démarrage en 1985 un soutien politique élevé, puis ce soutien s'est évaporé au fur et à mesure, aboutissant à l'abandon du projet en 1992.

En URSS, Nikita Kroutchev était devenu un inconditionnel de l'espace après le succès de Spoutnik. Il aimait au travers des exploits soviétiques montrer aux Américains la supériorité du socialisme. C'est lui qui a donné l'ordre à Korolev d'accélérer le lancement du premier Soyuz alors que les techniciens ne se savaient pas prêts. Le premier atterrissage fût un échec dans lequel le cosmonaute Komarov perdit la vie en avril 1967.

Aux Etats-Unis, c'est John Kennedy lui-même qui prit la décision d'envoyer des Américains sur la Lune pour laver l'affront de Spoutnik et de Gagarine.

Incontestablement, la décision d'un grand programme spatial peut dépendre de facteurs très différents et qui peuvent ne pas relever d'une rationalité d'ingénieurs.

### 3. L'organisation

Lorsqu'un programme est décidé, la première des choses à faire est de le structurer et de l'organiser. Décidé, cela veut dire que l'on dispose d'une enveloppe budgétaire, d'un calendrier de réalisation et, bien sûr, que l'on sait ce que l'on veut développer. Quelle que soit la nature technique du projet, son succès dépend avant tout de la qualité et de l'organisation des hommes qui l'entreprennent.

Le développement et la fabrication des missiles balistiques dès les années soixante puis des lanceurs Ariane, des satellites Symphonie, Intelsat, Spot ..., des missions scientifiques Goitto, Hipparcos, XMM ..., sont d'abord des aventures humaines. Interrogez ceux qui en ont été les acteurs, tous le confirmeront. L'organisation et le choix des hommes sont des éléments absolument fondamentaux de la réussite d'un programme. Dans un projet de grande ampleur et souvent de grande technicité, aucun homme aussi intelligent et aussi expérimenté soit-il ne peut en embrasser tous les aspects. C'est l'organisation de tous les intervenants qui permet d'entreprendre des projets aussi complexes. Et il en a sans doute été toujours ainsi. C'est très certainement une organisation appropriée qui a permis dans l'antiquité la construction des pyramides et au moyen-âge la construction des cathédrales.

#### Bâtir une organisation de projet parfaitement lisible

Un vaste projet ne peut être abordé de front. Il faut le décomposer pour le maîtriser. La façon de réaliser cette décomposition est extrêmement importante. Elle doit être logique bien sûr et ne comporter ni oubli ni redondance. Il faut assurer une totale cohérence entre la décomposition du produit, l'organisation industrielle et par voie de conséquence l'organisation contractuelle.

Quel que soit le produit à développer, lanceur, satellite, ou autre, il est fortement recommandé de le décomposer selon ses composantes **matérielles** et non ses composantes **fonctionnelles**. Cela veut dire décomposer le produit selon ses constituants matériels tels que pour un lanceur, ses étages, ses moteurs et non une décomposition par ses fonctions de tenue structurale, de propulsion ou de guidage et de pilotage. Les constituants matériels doivent être aussi le plus possible des produits dits « livrables et recettables ». Cela signifie des produits pour lesquels on peut établir des exigences techniques précises, que l'on confie à un industriel unique pour son développement et sa fabrication et pour lequel on peut, sans démontage, procéder à sa recette. La recette est l'opération par laquelle on contrôle les performances du produit et sa conformité aux exigences qui lui ont été données. Ce produit peut alors être incorporé dans un ensemble plus vaste qui subira à son tour une recette propre. Donnons des exemples : le calculateur de bord d'un satellite est un produit livrable et recetable. Il en est de même d'un capteur d'étoiles (repérage de la position du satellite) ou d'une roue de réaction (fabrication de couples pour faire tourner le satellite). Par contre, la chaîne de contrôle d'attitude qui comprend le capteur d'étoile, le calculateur de bord utilisé aussi dans d'autres fonctions, la roue de réaction, mais aussi une partie du logiciel de bord,

du câblage, etc...n'est pas livrable et recetable. On peut, bien évidemment, entreprendre des essais de validation et de performances de cette chaîne, ne serait-ce qu'en installant tous les équipements sur une même table, mais ce ne sera pas une recette d'un produit livrable pour la simple raison que cette chaîne n'est pas montée d'un seul tenant à bord du satellite. Ce sont seulement ses composantes qui sont assemblées une à une dans le satellite. La recette de la chaîne ne peut se concevoir que comme une partie de la recette du satellite tout entier. Il s'ensuit que, pour bâtir l'organisation du projet, les produits importants sont le satellite, le calculateur, le senseur d'étoile qui peuvent être confiés à des industriels différents. La chaîne de contrôle d'attitude qui n'est pas « livrable et recetable » doit être rattachée au satellite. Son étude et ses performances font partie de l'ingénierie satellite.

La recette est non seulement un évènement technique, c'est aussi un acte contractuel. Jusqu'à la recette, le fournisseur garde la responsabilité et la propriété au sens juridique de son produit. Après la recette, la propriété est transférée au client, le fournisseur ne conserve que des obligations de service après-vente et de garantie. La recette est donc un acte contractuel majeur qui doit répondre à un formalisme non ambigu. Il convient d'éviter, par exemple, que le client ait des responsabilités dans la réalisation du produit qui obscurcissent les limites de responsabilité du fournisseur.

Donnons deux exemples :

Les satellites ont la particularité de ne pas être réparables une fois en orbite. On prend donc un soin tout particulier pour la qualité des composants électroniques qui sont utilisés à bord. L'usage est que chaque composant possède sa feuille de caractéristiques, en anglais sa « data sheet ». C'est coûteux mais c'est jugé indispensable. L'approvisionnement des composants électroniques est alors souvent confié à une centrale d'approvisionnement qui regroupe l'ensemble des commandes du projet et procède aux recettes par lots. C'est plus efficace. On pourrait penser que la meilleure solution serait que la centrale mette gratuitement à disposition des différents fabricants d'électroniques les composants dont ils ont besoin. Ce n'est pas la solution utilisée, parce qu'elle retirerait aux fabricants la responsabilité de leurs composants. Il est indispensable qu'un fabricant d'équipement électronique soit engagé sur toute sa fourniture y compris les composants. Les « équipementiers » achètent donc leurs composants en passant par la centrale.

Dans de nombreux programmes financés par l'Etat, on rencontre fréquemment la notion de produit fourni par le client étatique (Government furnished equipment). Cette notion existe même si le client n'est pas l'Etat. On dit alors « Customer furnished equipment ». Cette disposition intervient lorsque l'équipement a déjà été développé à l'occasion d'un programme antérieur et peut être réutilisé en l'état ou aussi lorsque le développement de cet équipement contient des particularités et des risques qui ne peuvent être assumés dans le contrat. Cette façon de procéder ne porte pas à conséquence si la relation contractuelle entre le client et son fournisseur est du type de la régie, mais elle est une source de conflit évident dans le cadre d'un contrat au forfait et doit donc être proscrite dans ce cas.

L'organisation d'un programme d'un bout à l'autre de la chaîne contractuelle, du maître d'ouvrage au maître d'œuvre, du maître d'œuvre à ses fournisseurs doit être bâtie en respectant deux règles simples :

Premièrement, faire en sorte que chacun ait une connaissance parfaite de ce qu'il doit fournir à quelque niveau que ce soit dans la hiérarchie du programme ;

Deuxièmement, laisser à chacun sa pleine responsabilité dans la conception, le développement et la fabrication de son produit.

Chaque acteur doit connaître son rôle et celui des autres. Chaque client doit s'efforcer de responsabiliser ses fournisseurs. Son rôle est de bien spécifier le produit qu'il veut, d'approuver les travaux de développement et de qualification que lui propose son fournisseur

et, en phase de production de recetter le produit. Il ne doit pas se substituer à son fournisseur en matière de conception, voire de fournitures partielles.

Par construction, l'organisation des contrats doit être en totale conformité avec l'organisation du programme. Entre deux acteurs, il doit toujours exister un contrat qui décrit ce qu'attend le client de son fournisseur.

De façon générale, mais surtout pour les grands projets novateurs, il est indispensable de former des équipes de projet dédiées, chez le client comme chez les fournisseurs. Les hommes qui appartiennent à ces équipes sont à plein temps sur le projet. Ces équipes doivent recevoir une **délégation totale** de leur hiérarchie pour mener le projet. Délégation veut dire que le chef de projet, aidé de son équipe, a toute latitude pour engager financièrement et techniquement les actions à mener en les insérant dans le calendrier du projet. Il consulte sa hiérarchie, lui rend compte, mais sa hiérarchie lui fait confiance. Si le projet est important pour l'entreprise, qu'il engage sa réputation et ses finances, la liaison entre le chef de projet et le directeur de l'entreprise doit être la plus directe possible.

La réussite d'un projet implique que le client comme les fournisseurs se sentent également engagés. Le client doit être à la fois **spécificateur, autorité contractuelle et financeur**.

Lorsque le spécificateur n'est pas le payeur, on assiste à de forts dérapages des coûts. Ce fut le cas pour le cargo ATV où Russes et surtout Américains imposaient leurs contraintes sans souci des moyens. L'ESA payait... Résultat : entre le montant final et celui du premier contrat, le coefficient  $\pi$  a été atteint !

Les spécificateurs des clauses de sécurité des biens et des personnes ne doivent pas échapper à la règle. Même s'ils jouissent d'une large indépendance, ils doivent être rattachés au client. La sauvegarde des biens et des personnes fait partie des spécifications exigées d'un projet de lanceur. Elles sont définies dans le règlement de sauvegarde émis par le Centre Spatial Guyanais. Le service de sauvegarde du centre est rattaché directement au directeur général du CNES qui a reçu délégation de l'état français pour assurer cette mission. Même avec une grande indépendance, la sauvegarde est bien attachée au client. Le règlement de sauvegarde ne peut pas être modifié sans que les conséquences sur le lanceur et ses « moyens sol » ne soient approuvées techniquement et financièrement par le projet.

Comment peut-on tenir les coûts d'un projet si des organismes externes peuvent exiger des spécifications sans se préoccuper des conséquences financières ?

## **Portrait d'un chef de projet**

Il est évident que les qualités d'un chef de projet vont considérablement influencer sur le déroulement d'un projet. Je cherche à définir ici ce qu'on attend d'un chef de projet. Si sa hiérarchie lui délègue tous ses pouvoirs pour mener le projet, le chef de projet ne peut le mener seul. Beaucoup de décisions lui remontent, mais il ne peut se comporter en despote, même éclairé. Il doit se comporter en chef d'orchestre qui emmène avec lui de nombreux musiciens dont la plupart ont un talent supérieur au sien dans la maîtrise de leurs instruments. Bien évidemment doit émaner de lui une autorité naturelle, mais il est essentiel qu'il sache écouter chacun des spécialistes et les personnes attachées au projet. Ses décisions, puisque c'est à lui qu'incombent les décisions difficiles, doivent être prises sur des données consolidées, en respectant au mieux les consensus et surtout en expliquant pourquoi la décision est prise dans un sens et pas dans un autre. Nous sommes au cœur de grands projets techniques et les personnes qui y travaillent sont le plus souvent des ingénieurs qui ont besoin de comprendre la rationalité des décisions pour donner le meilleur d'eux-mêmes.

Au sein de son organisation, le chef de projet a lui-même délégué aux membres de son équipe des tâches en conformité avec l'organisation générale mise en place. Il doit prendre soin de respecter lui-même les délégations qu'il a mises en place. Il doit s'abstenir de court-circuiter ses propres troupes. Mais c'est lui le seul responsable de l'information périodique qu'il doit aux décideurs qui financent le projet, y compris lorsqu'il s'agit de bonnes nouvelles ! Et en cas de crise, c'est lui qui continue de gérer le projet, en relation étroite avec sa hiérarchie.

De même, il est important qu'il respecte totalement les procédures qu'il demande à son organisme et ses sous-traitants de suivre. Il n'est pas au-dessus des autres !

Toute son action doit être menée dans l'intérêt du projet. Il doit éviter les polémiques inutiles sans rapport avec l'avancement du projet. Dans un projet technique, la matière suit les lois de la physique et personne ne peut les contourner. Pourtant dans le choix des technologies, certains ingénieurs s'y attachent tellement qu'ils en font des affaires personnelles. Cela n'a pas lieu d'être. On ne recherche ni vainqueur ni vaincu. On cherche ce qui est le plus sensé pour l'avancement du projet à l'instant où l'on doit décider et dans les conditions dans lesquelles on se trouve. Personne ne dispose d'une vérité absolue, mais tout le monde sait que pour avancer, il faut faire des choix.

Un chef de projet se doit d'être toujours positif. Regarder en arrière ne sert à rien. Au début d'un projet, lorsque la définition de tous les éléments n'est pas encore acquise, on peut parfois s'autoriser quelques retours en arrière, mais pas lorsque les développements sont lancés. Il faut alors assumer.

Une autre caractéristique intéressante des grands projets en développement, concerne la nature des compétences dont il faut s'entourer. Les hommes ne sont pas tous les mêmes entre le début du projet, la fin du développement et l'exploitation. Au début, on rencontre des hommes de recherche qui ont proposé des techniques bien spécifiques pour résoudre les problèmes posés. Dès qu'ils ont la certitude que leur proposition va fonctionner, ils ne souhaitent pas forcément poursuivre. Ils préfèrent entamer d'autres recherches. Dans le projet SPOT, je me souviens du cas de l'ingénieur qui a proposé la solution technologique pour construire une ligne de détecteurs de 6000 pixels à partir de détecteurs de 1732 pixels. La précision d'alignement devait être de l'ordre du micron. Une fois que l'industriel en charge en a démontré la faisabilité, cet ingénieur a quitté le projet.

Dans un autre registre, le profil des personnes qui prendront en charge les opérations de déploiement en orbite et d'exploitation d'un satellite est différent de celui des ingénieurs de conception. Ces opérationnels, comme on les appelle, se recrutent progressivement au fur et à mesure du développement. Il est bon d'ailleurs que le projet dispose au plus tôt, d'au moins un de ces profils pour tenir compte des contraintes opérationnelles dès la conception et les études de définition. Le chef de projet doit savoir gérer ses effectifs, faire croître son équipe et, plus difficile, la faire décroître.

## **La responsabilité système**

Dans des programmes complexes, où les interactions d'un élément sur un autre sont fortes, il faut, au sein du projet, bien mettre en évidence le niveau système complet. Suivant la taille du projet ce sera une équipe plus ou moins importante, mais le chef de projet ne peut se passer de cette vision à ses côtés.

Il faut rappeler ici les déboires du lanceur Europa pour s'en persuader. Ce projet proposé par les Britanniques aux Français, qui ont souhaité associer les Allemands et les Italiens, a démarré dans les années 60. Le projet était bâti comme un empilement d'étages sans vision système contraignante. Les Anglais fournissaient le premier étage qui, durant son vol, pilotait le lanceur. Les Français développaient le deuxième étage, qui assurait à son tour le pilotage durant son vol. Les Allemands produisaient le troisième étage et le pilotage de leur phase. La

coiffe était italienne. Hors le premier étage produit par les Britanniques sous licence américaine, l'industrie manquait encore d'expérience dans le développement de lanceurs, chaque participant en profitant pour poursuivre au passage ses propres objectifs technologiques. Ce lanceur n'a jamais pu mettre en orbite un seul satellite après une dizaine de tentative. On en a tiré la conclusion que l'aspect système n'avait pas eu la considération méritée et, pour le projet Ariane, le plus grand soin a été apporté à ce niveau avec la mise en place d'une équipe industrielle appelée « Architecte Industriel » qui a démontré toute son utilité au long des développements de tous les lanceurs de la famille Ariane.

Pour les systèmes de satellites, il en est de même. Au sein d'un satellite, il y a une plateforme qui assure les fonctions de tenue structurale, de contrôle thermique, de production d'énergie, de contrôle d'attitude et d'orbite et de gestion du fonctionnement du satellite. Elle est au service d'une charge utile dont la définition est liée à la mission (télécommunications, observation, sciences). Un satellite forme par lui-même déjà un système complexe et il ne faut jamais oublier qu'il n'est pas un objet isolé. Il est mis en œuvre par des moyens au sol (stations de réception de télémesure et d'envoi de télécommande, bancs de contrôle, moyens de traitement au sol des informations reçues). C'est l'ensemble qui forme un système et qui doit être considéré avec soin.

### **Les responsables qualité**

Dans des projets spatiaux complexes, la notion de qualité ou, mieux dit, d'assurance produit s'est vite introduite. Au tout début des développements de satellites, les composants électroniques étaient d'une qualité si faible qu'il ne supportait pas les vibrations au lancement et leur durée de vie était courte. On les noyait dans une sorte de résine pour les protéger des vibrations. Changer un composant devenait vite une aventure !

C'est ainsi que la notion de qualité s'est introduite. Mais certains ont voulu, de mon point de vue, aller trop loin. Ils faisaient des équipes qualité non seulement les gardiens des règles à appliquer pour obtenir des équipements de bonne qualité, mais ils se voyaient comme les contrôleurs du chef de projet et de ses équipes. Ils réclamaient leur indépendance du projet pour appliquer leur pouvoir de censure. Ce n'est à mon avis pas la bonne démarche.

La qualité fait partie du projet et se doit de faire partie de la responsabilité du chef de projet. Le ou les responsables qualité doivent être dans l'organigramme du projet. Leur interaction avec les différents responsables du projet doit faire partie de la vie du projet comme interagissent entre elles les interfaces internes du projet. Leur relation, fonctionnelle, avec le responsable qualité du groupe auquel appartient le projet continue d'exister, mais doit être clairement définie.

Sur le modèle électrique du satellite SPOT, nous avons rencontré un phénomène dit de « peste pourpre » qui s'est révélé sur tous les connecteurs de tous les câblages de la plateforme du satellite. La couche fine d'or déposée sur les connections pelait et le passage du courant en était altéré. C'est la qualité qui a mené l'enquête pour évaluer l'étendue des dégâts et trouver les réparations à entreprendre, mais c'est le responsable de la plateforme qui a mis en œuvre les actions à effectuer. Chacun avait joué son rôle. Pour information, tous les connecteurs (environ 100.000) ont été changés et le planning du projet en a été impacté.

### **La communication au sein du projet**

Il est fondamental que la circulation de l'information au sein des équipes de projet et entre celles des clients et des fournisseurs soit fluide et organisée. Au sein d'une équipe de projet, je recommande une réunion hebdomadaire, en général la réunion du lundi, entre le chef de projet et ses responsables directs. A eux, ensuite, de faire diffuser l'information à ceux qui ont besoin d'en connaître, comme l'on dit.



Entre client et fournisseur, liés par un contrat important, la règle d'une réunion mensuelle me semble bien adaptée. Elle doit se dérouler de façon formelle, avec un ordre du jour approuvé des deux côtés et qui balaie tous les points en suspens. Si des points particuliers méritent des réunions spécifiques, cela doit être décidé lors de ces réunions mensuelles. Un compte-rendu doit être établi mettant en avant les décisions et aussi les actions en cours.

Une récurrence moindre est mise en place pour les contrats de fournitures plus simples. Elle doit être indiquée dans les clauses contractuelles.

Faut-il exiger des comptes rendus formels d'avancement en plus ? Je pense que cette exigence est un peu redondante avec l'organisation des réunions mensuelles. Il y a cependant un aspect qui me semble intéressant, c'est de demander aux responsables de prendre quelques heures de leur temps à réfléchir aux problèmes qui ne sont pas encore apparus et qu'ils estiment pouvoir peut-être se présenter. Quitter le feu de l'action momentanément pour se demander quel pourrait bien être la prochaine difficulté est un très bon exercice à condition de ne pas sombrer dans le pessimisme le plus noir, ou l'optimisme le plus béat, bien évidemment !

## L'organigramme technique

De façon plus technique, l'organisation se reflète dans l'organigramme technique (OT ou WBS, Work Breakdown Structure, en anglais). L'OT codifie tout d'abord la décomposition du programme qui a été retenue. Le principe en est simple et il est facile de l'illustrer par un exemple. Prenons le cas d'Ariane 4:

Le lanceur complet se voit attribuer le numéro	1 000 000, responsable Architecte Industriel
Le premier étage, le numéro.....	1 100 000, responsable Aérospatiale
Le deuxième étage.....	1 200 000, responsable ERNO
Le troisième étage.....	1 300 000, responsable Aérospatiale
La case d'équipements.....	1 400 000, responsable MATRA

Et ainsi de suite.

Puis, allons plus en détail au sein du premier étage,

Les moyens sol de production de l'étage,

Mécaniques.....	1 1B0 000, Aérospatiale
-----------------	-------------------------

Electriques.....	1 1C0 000, Aérospatiale
------------------	-------------------------

(on note que les moyens sol sont repérés par des lettres alors que les matériels bord le sont par des chiffres)

Les structures de l'étage.....	1 110 000, Aérospatiale
--------------------------------	-------------------------

La jupe avant.....	1 110 110, CASA
--------------------	-----------------

La jupe inter réservoirs.....	1 110 120, CASA
-------------------------------	-----------------

Le réservoir principal (U ou N, ce sont les mêmes)	1 110 200, Aérospatiale
--	-------------------------

La baie de propulsion.....	1 120 000, SEP
----------------------------	----------------

Au sein de cette baie, on trouve :

Le moteur Viking.....	1 121 000, SEP
-----------------------	----------------

Sur ce moteur, se trouvent, par exemple :

La chambre de combustion.....	1 121 110, Volvo
-------------------------------	------------------

La turbopompe.....	1 121 200, MAN
--------------------	----------------

A chaque numéro de l'OT correspond bien un responsable et un seul.

Il n'est peut-être pas utile de poursuivre car le principe est simple. On peut choisir un autre système de codification, ce n'est pas ce qui est important. Nous construisons ainsi **l'arbre des produits**.

Mais cela ne suffit pas. Il faut aussi pouvoir gérer les travaux réalisés pour le développement et la fabrication de ces produits. Pour cela, on ajoute à chaque niveau un code de fonctions qui répertorient les tâches.

Pour identifier les fonctions, on utilise des lettres (là encore, on peut choisir d'autres codifications, ce qui suit n'est qu'un exemple):

- A**.....fabrication, assemblages et contrôles
- B**.....essais
- C**.....gestion
- D**.....qualité
- E**.....ingénierie
- F**.....taches diverses qui ne sont pas associées aux précédentes rubriques
- Z**.....regroupement d'au moins deux taches de A à E, lorsqu'il n'est pas nécessaire de subdiviser davantage

Enfin pour identifier les tâches, on ajoute un code à quatre chiffres qui n'est qu'un numéro d'ordre. Ainsi :

Assemblage et contrôles du premier étage.....	1 100 000 A 0000
Essais du premier étage.....	1 100 000 B 0000
Gestion du premier étage.....	1 100 000 C 0000
Ingénierie du moteur Viking.....	1 121 000 E 0000

et ainsi de suite.

Nous obtenons alors **l'arbre des tâches**. Pour un industriel donné, ses propres tâches doivent être définies au plus haut niveau de l'Organigramme Technique qui le concerne. Les tâches d'Aérospatiale « étagiste » se situent au niveau de l'étage, celles de SEP au niveau de la baie de propulsion et ainsi de suite.

Dans la gestion du programme, chacune des tâches identifiées par l'Organigramme Technique est décrite par les données nécessaires à son exécution ou données d'entrée ; par les travaux exécutés au titre de la tâche ; et par les résultats attendus ou données de sortie. Pour chaque tâche, on identifie une date de début et une date de fin, et un montant financier comprenant les heures internes et les achats nécessaires à son exécution. Sur ces bases sont construites les propositions industrielles vers les clients et bien sûr, après négociations, cet arbre des tâches sert à la gestion du contrat.

Néanmoins, le contrat n'est, en règle générale, pas construit directement sur cette décomposition très détaillée. Les tâches sont toujours regroupées au sein de lots contractuels en nombre plus limités. Par exemple le contrat d'Architecte Industriel d'Ariane 1 comportait plusieurs centaines de tâches et seulement vingt lots contractuels.

#### 4. Les contrats

Il n'y a aucune règle absolue. Les différentes formes de contrat sont possibles. Il y a des avantages et des inconvénients dans toutes les formules, mais les choix en la matière dépendent avant tout de la nature des risques propres au projet entrepris.

Pour des projets très novateurs, tels le premier lanceur de la famille Ariane, l'avion spatial Hermes, un nouveau satellite, un nouvel instrument scientifique, les risques sont considérables et seuls les Etats sont capables de les assumer complètement. Dans ces cas, de véritables contrats à forfait entre maître d'ouvrage et maître d'œuvre ou grands responsables industriels sont illusoire. Lorsque surviennent des aléas avec des conséquences financières élevées, les fournisseurs industriels ont les moyens de demander la révision de leur contrat même forfaitaire au maître d'ouvrage qui, s'il tient à son projet, est bien obligé de négocier quelques rallonges. D'ailleurs, dans ce type de projets, de vrais forfaits exigeraient de la part des fournisseurs l'inclusion de marges pour risques

incompatibles le plus souvent des enveloppes budgétaires des clients. J'ai déjà indiqué qu'il est préférable de mutualiser les risques au plus haut niveau, c'est-à-dire au niveau du maître d'ouvrage. Dans ces cas, les contrats en régie avec plus ou moins d'intéressement sont de bonnes solutions. Ce fut le cas pour Ariane 1. Lorsque les coûts de développement du cargo ATV se sont révélés bien supérieurs à la prévision initiale, j'ai fait valoir que l'industrie ne pouvait pas supporter une perte sur un développement sans débouché commercial et qu'il fallait mieux abandonner. L'Agence Spatiale Européenne a alors compris la situation et a transformé le contrat forfaitaire en contrat en régie. Elle contrôlait ainsi mieux les financements entraînés par cette réalisation à laquelle elle s'était engagée devant les Russes et les Américains.

Pour le développement du dernier missile balistique, le M51, la Délégation Générale de l'Armement avait demandé au maître d'œuvre un contrat au forfait couvrant toutes les sous-traitances y compris la propulsion qui représente près de la moitié des coûts. Naturellement, la réponse industrielle contenait des marges pour risques assez importantes. Elle valorisait le forfait au-delà des budgets disponibles. Pour rentrer dans les limites budgétaires, la couverture des risques a été rendue à la DGA. Dans un tel domaine où il n'y a pas de marché, un industriel ne peut faire des pertes. C'est bien à l'Etat de couvrir les risques. Le contrat a été passé au forfait mais le maître d'œuvre ne supportait plus que les petits risques, ceux inférieurs à un certain montant pour ses travaux propres et ne prenait plus aucun risque pour les grandes sous-traitances.

Finalement, même si les contrats en régie ne semblent plus en vogue, je crois encore à leur vertu pour des développements très novateurs et par conséquent très risqués. Le client peut disposer alors d'une grande visibilité sur les dépenses et l'industrie peut mettre ses meilleurs moyens. Combien de contrats au forfait masquent lorsque tout se passe bien des marges élevées et aboutissent à des remises en cause importantes lorsque les risques se révèlent ?

Pour les contrats commerciaux et les programmes à risques modérés, les contrats au forfait s'imposent naturellement. La notion de risques modérés est bien évidemment subjective. Les contrats commerciaux devraient être tous de cette nature. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas. Nombreux sont les industriels qui se sont masqués les risques de programme et qui ont subi de lourdes pertes. Une analyse la plus objective possible des risques revue par d'autres que les commerciaux toujours prompts à minimiser les risques de leurs offres est essentielle pour éviter de gros déboires. Lorsque la charge décroît et que le besoin de commandes nouvelles se fait de plus en plus urgent, la pression est forte pour minimiser les risques encourus par certains marchés. Un industriel peut choisir de courir certains risques mais cela doit être fait consciemment, avec une évaluation réaliste des conséquences financières possibles.

Dans un contrat, forfait ou régie, il peut être judicieux d'introduire des primes d'intéressement. Dans le contrat d'Architecte Industriel d'Ariane 1, nous avons introduit un intéressement lié à la sortie des Spécifications Générales qui, nous en reparlerons, étaient très utiles pour tous à condition d'être éditées tôt dans le développement. Le cumul des retards était comptabilisé et s'il n'excédait pas une certaine durée, six mois dans mon souvenir, une prime était versée. Les équipes de l'Architecte ont pris très au sérieux ce défi et ont tout fait pour remporter la prime. A noter que dans une grande société comme Aerospatiale, cette prime n'a pas été distribuée à ceux qui avaient fait beaucoup d'efforts pour l'obtenir. Les syndicats ont jugé qu'une telle prime ne pouvait être distribuée à certains qui avaient la chance de travailler pour un tel contrat et qu'il fallait récompenser tout le monde, c'est-à-dire personne puisque la somme devenait dérisoire lorsqu'on la divisait par le nombre d'employés. Sur le projet SPOT 1, une prime avait été introduite pour accélérer les travaux d'assemblage et d'intégration du premier satellite. Dans ce cas aussi un bel effort a été fourni et ceux qui ont participé à l'effort ont été individuellement récompensés. Le maître d'œuvre était MATRA. C'est la différence entre le capitalisme d'Etat et le capitalisme privé !

## **Public Private Partnership : le PPP**

Pour de nombreux organismes publics qui ont de grandes difficultés à obtenir les crédits nécessaires aux développements qu'ils souhaitent, une méthode, très utilisée à une certaine période, consiste à recourir à un financement partagé entre public et privé, le PPP (Public Private Partnership). Cela a été d'abord une mode britannique qui s'est étendue au reste du continent. Ainsi, l'armée de l'air britannique ne souhaite plus acheter et entretenir sa flotte d'avions ravitailleurs. Elle préfère acheter les services d'un consortium industriel qui lui garantit le ravitaillement de ses avions dans toutes les situations et qui est rémunéré en fonction des services rendus. C'est le concept de plus en plus souvent retenu par les Armées de l'air, ou certaines compagnies aériennes pour les moteurs. Je ne connais pas personnellement les risques que court le consortium industriel dans ce cas précis britannique, mais j'ai le sentiment que d'une part le développement d'une flotte de ce type ne comporte pas de nouveautés entraînant des prises de risques excessives et que d'autre part, la facturation des services peut se faire sur des bases claires et incontestables. Cela a été aussi appliqué au système de télécommunications militaires britanniques Skynet 5 avec succès.

Un exemple plus malheureux concerne le projet Galileo de système de navigation par satellites. L'Union Européenne qui a été chargée de son développement avait pensé qu'un consortium industriel pouvait investir dans ce grand système et se rémunérer en vendant des services aux États, aux autres industriels, au public... Après de nombreuses péripéties dont nous avons déjà parlées, cette idée s'est révélée inapplicable. Face à l'utilisation gratuite du système GPS américain, le marché commercial de Galileo n'était pas évident et le consortium industriel ne voulait se charger de l'affaire que si l'Union lui garantissait un minimum de revenus dans chacun des services proposés. Les négociations entre l'industrie et l'Union n'ont finalement pas abouti et c'est l'Union elle-même qui a fini par prendre les risques et renoncer à ce PPP. Mais que de temps perdu !

Cet exemple rappelle deux règles : tout investissement industriel exige un retour sur investissement dans des délais courts, quelques années seulement ; les grandes infrastructures, surtout lorsqu'elles sont liées à des aspects de souveraineté, sont du ressort des États car aucun industriel ne peut en assumer les risques. Cette règle s'applique particulièrement aux affaires spatiales ou militaires. Aucun développement de lanceurs, d'infrastructure orbitale, de satellites de nouvelle technologie, ne peut être pris en charge par un groupe industriel. Aucun entrepreneur privé ne financera le vol habité sur la Lune ou sur Mars, quoiqu'on en dise !

## **Les programmes spatiaux et l'empilement des marges bénéficiaires**

Dans les contrats financés par les États, se pose le problème de l'empilement des marges bénéficiaires pour lesquels il n'existe pas de solution totalement satisfaisante à ce jour. Les points de vue des agences, des industriels et des analystes financiers divergent et ne sont pas conciliables.

Les agences et surtout l'Agence Spatiale Européenne, sont confrontées à la situation suivante : pour les programmes de développements, elles déterminent un maître d'œuvre industriel choisi très généralement dans l'industrie spatiale des « grands » pays, France, Allemagne, Italie, Royaume Uni. Ensuite elles aiment attribuer des responsabilités de sous-systèmes à différents industriels en fonction des participations des pays. Ces attributions vont à des pays au-delà des « grands », Suisse, Espagne, Belgique, Pays-Bas... Enfin, la détermination des responsables d'équipements vient compléter l'organisation industrielle. Il est bien évident que les industriels des « petits » pays sont plus souvent placés en position d'équipementiers. Ils se situent ainsi au bas de la pyramide contractuelle. Ils reçoivent leurs contrats des sous-systémiers qui, eux-mêmes les détiennent des maîtres d'œuvre. Cela a

pour conséquence que si chaque niveau prenait une marge, les travaux effectués au plus profond de la hiérarchie contractuelle seraient grevés par l'empilement successif de ces marges. Qui financerait ces marges, le petit pays de l'équipementier ou le grand pays du maître d'œuvre ? Si un petit pays finance son équipementier, il couvrirait l'ensemble des marges et il serait en droit de ne pas être satisfait car le taux de marge affecterait plus largement sa contribution que ne le sont celles des pays maîtres d'œuvre. Si, au contraire un grand pays finançait toutes les marges d'un contrat de maîtrise d'œuvre, il serait mécontent aussi puisqu'il verrait sa cotisation amputée des marges des produits fabriqués ailleurs, que son industrie aurait sans doute pu produire. Pour résoudre cette difficulté, la solution mise en place s'apparente au système de la Taxe à la Valeur Ajoutée. On a créé la notion de « sous-traitance de coopération » dans laquelle les coefficients d'approvisionnements pratiqués au long de la chaîne contractuelle sont très réduits. Il n'y a donc plus d'empilements des marges qui détériorent l'efficacité des contributions des petits pays. Cette solution n'est pas mauvaise en soi. Elle a cependant un inconvénient majeur. Elle n'est absolument pas comprise par les financiers des grandes entreprises. Dans un contrat de maîtrise d'œuvre, la part des sous-traitances de coopération est importante. Elle représente une part très significative, de 50% à 75%, du chiffre d'affaires généré par le contrat de maîtrise d'œuvre. Dans le système adopté, cette portion du chiffre d'affaires ne contribue pas ou presque au résultat puisque, par principe, seuls les travaux propres, qui représente la valeur ajoutée, ont droit à des marges bénéficiaires.

De plus, le taux de marge est très limité (contrat en régie). Les agences spatiales acceptent très rarement des taux qui sont supérieurs à 8%. Dans le cas d'un contrat de maîtrise d'œuvre qui comporte la moitié sous forme de sous-traitance de coopération, on voit que la rentabilité du contrat ne peut être meilleure que 4%. Face à des financiers, ces contrats sont alors très difficiles à défendre ! S'il n'y avait pas des charges de travail importantes et des progrès technologiques intéressants à attendre de ces contrats, il y a longtemps que les grands industriels auraient délaissé l'espace.

## 5. Les spécifications

Revenons à la décomposition du projet présentée au chapitre « Organisation ». Sur l'arbre des produits, on construit l'arbre des spécifications. Cela veut dire que l'on établit pour chaque produit livrable et recetable une spécification qui rassemble toutes les exigences qu'il doit satisfaire, exigences en terme de performances techniques, mais aussi en matière de données d'interfaces avec les autres produits et en matière de logique de développement et de qualification.

Dans l'arbre des spécifications, il y a une spécification de premier niveau, la spécification du système complet, puis les spécifications des produits de second niveau de l'organigramme et ainsi de suite jusqu'au bout des ramifications de l'arbre des produits. On construit ainsi l'arbre des spécifications. Celui-ci est idéal lorsqu'on arrive à ne jamais répéter deux fois la même exigence au travers de l'arbre. C'est assez difficile à réaliser pour plusieurs raisons. Une exigence qui s'applique à plusieurs produits doit être inscrite au niveau de l'arbre des produits qui rassemble tous les produits auxquels cette exigence s'applique, de façon à n'être écrite qu'une seule fois. Alors toutes les spécifications relatives à ces produits doivent se référer à la spécification du niveau supérieur qui les englobe. Pour les équipementiers du programme, cela signifie qu'il ne reçoive pas une spécification unique qui se suffit à elle-même, mais une documentation plus large qui fait référence à des documents situés à un niveau supérieur dans la hiérarchie des produits, puisque certaines exigences s'appliquent à d'autres. En général, les équipementiers n'aiment pas cette démarche parce qu'elle les oblige à manipuler une large documentation pour rassembler toutes les exigences relatives au produit dont ils ont la responsabilité. Pourquoi le souhaite-t-on alors ? La réponse est simple. C'est parce que c'est le meilleur moyen de gérer dynamiquement l'arbre des spécifications. En cas de modification, et cela est fréquent au cours de la vie d'un programme, l'arbre reste toujours cohérent. On ne court pas le risque du cas où la même spécification est répétée plusieurs fois et où sa modification n'est pas intégralement retranscrite partout où elle a été formulée.

Aujourd'hui, à l'aide des moyens informatiques de gestion de la documentation, on peut disposer d'un arbre de spécifications où des liens entre des exigences identiques permettent de donner à plusieurs niveaux la même spécification tout en assurant une mise à jour complète en cas de modification. La difficulté est donc en principe largement résolue. Néanmoins, vérifiez que tout se passe correctement !

### Les spécifications générales

Dans l'arbre des spécifications, on peut se rendre compte assez vite qu'un certain nombre de spécifications s'appliquent quelque fois à tous les produits, d'autres fois à des catégories entières de produits comme toutes les structures ou tous les équipements électriques et électroniques. Il est alors très intéressant de recourir à la notion de Spécification Générale SG ou SR pour System Requirements. Au sein de ces spécifications, on peut même en distinguer deux sortes : d'une part, les spécifications qui reflètent ce que l'on pourrait appeler l'état de l'art et qui peuvent non seulement être employées sur un projet mais encore sur tout un ensemble de projets similaires, tous les lanceurs ou tous les satellites par exemple ; d'autre part, les spécifications qui ne sont générales que pour un projet donné. Dans les premières, on trouve ainsi les spécifications générales de dimensionnement des structures qui définissent les méthodes de calculs des charges de dimensionnement et les facteurs de sécurité ou, encore, les spécifications générales électriques qui, par exemple, fournissent les règles de mise à la masse des câblages et des équipements électriques. Pour les satellites, mais aussi pour les éléments de lanceur proches des satellites, il existe une spécification générale qui définit les règles admissibles en matière de dégazage sous vide

des matériaux. Il faut en effet bannir tous les matériaux qui pourraient polluer les optiques des senseurs ou des instruments par leurs produits de dégazage. Dans les spécifications générales qui ne sont valables que pour un programme spécifique, on trouve toutes celles qui définissent les charges mécaniques et thermiques sur les éléments du lanceur ou du satellite étudié, les valeurs dépendant totalement de l'architecture retenue.

En ce qui concerne l'aéronautique, il existe des « Spécifications de Certification (CS) » et des moyens pour les satisfaire, les « Means of Compliance (MoC) » auxquelles les avionneurs doivent se conformer pour concevoir, construire, faire voler, opérer et maintenir un aéronef. Pour espérer qu'il soit certifiable par les Agences internationales (FAA, EASA,...) leur produit doit répondre strictement à ces exigences. La documentation des CS et MoC fait l'objet d'évolutions en fonction de l'état de l'art, émises par les Agences, après publication provisoire pour l'obtention d'un consensus de toutes les parties en présence. Au fur et à mesure que le domaine spatial accroît sa maturité, les spécifications générales multi-programmes sont de plus en plus utilisées comme dans l'aéronautique. Cependant, si un saut technologique important se fait dans l'aéronautique, il faudra sans doute repenser ces spécifications plus ou moins profondément.

La liste et les titres des spécifications générales du programme Ariane 1 donne un bon aperçu de ce que peuvent contenir ces spécifications.

#### *Conception mécano-thermique*

**SG-1-11** Conception et essais des structures\*

**SG-1-10** Conception et essais des protections thermiques\*

**SG-1-12** Combinaison des charges pour le dimensionnement d'un produit

#### *Charges de dimensionnement*

**SG-1-20** Trajectoires de dimensionnement

**SG-1-21** Ambiance thermique

**SG-1-22** Efforts généraux

**SG-1-23** Ambiance dynamique

**SG-1-24** Charges spéciales

**SG-1-25** Exigences particulières après études dynamiques du système

#### *Conception électrique*

**SG-1-30** Conception des systèmes électriques de bord\*

**SG-1-31** Conception et essais des systèmes pyrotechniques\*

**SG-1-33** Conception des systèmes électriques sol\*

**SG-1-35** Essais de compatibilité électromagnétiques sur les sous-ensembles du lanceur

#### *Essais*

**SG-1-40** Spécification de qualification et de réception en environnement des équipements et des câblages\*

**SG-1-41** Essais dynamiques des sous-ensembles

\*Spécifications pouvant être utilisées sur tout type de lanceur

Sur le programme Ariane 1, la disponibilité de ces spécifications générales assez tôt dans le programme a été très certainement une des clés du succès du programme. Il faut dire qu'à l'époque d'Europa, ces spécifications n'existaient pas. Chacun avait l'habitude de dimensionner les produits sous sa responsabilité en définissant lui-même les exigences et les études système faisaient uniquement un contrôle a posteriori de la cohérence de ces exigences.

Les spécifications générales qui sont le reflet de l'état de l'art, c'est à dire de l'état des technologies ont toutes les raisons d'être disponibles pratiquement au démarrage du programme. Pour celles qui renferment des données spécifiques du programme, c'est beaucoup plus difficile. Il est nécessaire d'avoir réalisé au moins une boucle de dimensionnement du véhicule à développer pour connaître ces données. Une boucle de dimensionnement, c'est l'exercice qui consiste à dimensionner des éléments un peu « au pif », puis sur cette base à définir un véhicule et sur cette définition à recalculer les données pour le dimensionnement de tous les éléments. Alors les responsables des divers éléments refont leur dimensionnement. Plusieurs boucles sont faites au cours d'un développement, mais il est très important que dès la première on en déduise des spécifications générales de dimensionnement les plus « définitives » possible, même si quelques incertitudes subsistent. Il est essentiel pour le bon avancement d'un programme de faire l'effort de sortir vite ces spécifications générales, même si elles ne sont pas tout à fait complètes ni tout à fait précises. Les boucles de dimensionnement suivantes - les moyens numériques actuels permettant d'en diminuer le nombre - viendront les confirmer et les préciser. Malgré tout, il vaut encore mieux ne pas avoir à modifier dans de trop grandes proportions les valeurs de dimensionnement au cours du programme. Cela devient d'autant plus coûteux que l'on avance dans le développement. Tout l'art de l'ingénieur système consiste donc à discerner si les premières valeurs des spécifications contiennent les marges adéquates qui feront qu'au cours du programme on pourra résister à un certain nombre de modifications. Des dimensionnements sans marges sont d'ailleurs souvent anti économiques car ils n'offrent aucun potentiel de croissance et un certain potentiel peut se révéler très appréciable par la suite. Bien sûr, des marges exagérées ne conviennent pas non plus, puisque les performances en souffriraient trop. Tout est donc une question de mesures qui sont laissées à l'appréciation des ingénieurs système. Un certain flair, c'est-à-dire un certain sens des phénomènes physiques, est une des qualités recherchée chez les ingénieurs qui rédigent ces spécifications système. Cela relève de l'art de l'ingénieur ! Et c'est satisfaisant pour l'esprit de savoir que tout n'est pas robotisé dans ces grands programmes technologiques.

La performance d'Ariane 1 était de 1700 Kg sur l'orbite de transfert géostationnaire. La filière de 1 à 4, a permis de faire croître la performance sur la même orbite jusqu'à 5 tonnes, au prix seulement de certaines requalifications bien évidemment. Mais, il y avait intrinsèquement des marges suffisantes pour atteindre 5 tonnes. Pour aller plus loin, il y a eu rupture et Ariane 5 a eu une architecture totalement différente.

### **Qu'est-ce qu'une bonne spécification technique?**

La rédaction des spécifications des produits de l'Organigramme Technique est une tâche déterminante dans le succès d'un développement. Ne pas oublier que de la spécification dépendra la performance. Il faut savoir les rédiger pour y mettre ce que l'on pourrait appeler le juste nécessaire. Il faut, avant tout, s'attacher à définir toutes les exigences du produit vu de l'extérieur et le moins possible imposer des solutions techniques. Il est obligatoire, enfin, de définir les exigences en matière de résistance du produit à l'environnement extérieur auquel on envisage de le soumettre, mais pas forcément à son environnement induit, c'est-à-dire à l'environnement qu'il produit lui-même.

Donnons des exemples pour faciliter la compréhension.

Pour un lanceur comme Ariane, les grandes exigences qui se trouvent dans la spécification du lanceur sont :



- les performances en terme de masse de satellites sur une ou des orbites de référence (sur Ariane 1, une seule orbite de référence a été retenue, l'orbite de transfert géostationnaire 200 Km-36000 Km)
- les limites de l'environnement créé par le lanceur sur le ou les satellites qu'il lance : accélérations, vibrations, bruit acoustique, température, etc... (il faut mieux éviter que le lanceur ne produise un environnement qui détruit le satellite !)
- les services rendus par le lanceur à ses satellites : mode de fixation sur le lanceur, liaisons électriques, liaisons radiofréquences, conditionnement d'air, etc...
- les interfaces avec le pas de tir et les contraintes de sauvegarde du centre de lancement
- les caractéristiques de l'atmosphère traversée (atmosphère standard et déviations), les vents et les rafales rencontrées au sol et en vol ; les risques de foudre ...

Ce sont les principales exigences techniques que l'on peut avoir sur le produit lanceur vu de l'extérieur et l'on devrait peut-être s'arrêter là. Dans la réalité, toutefois, on impose aussi quelques contraintes d'architecture à respecter par le fournisseur. Ainsi, pour Ariane 1, on a imposé un lanceur tri-étage pour des raisons de réduction des coûts et des risques de développement. Pourtant, le fournisseur aurait pu concevoir un lanceur bi-étage, mais le deuxième étage aurait été un étage cryotechnique d'assez grande taille, dont le développement aurait été plus hasardeux, principalement à cause du moteur qui aurait été très éloigné de la petite expérience disponible à l'époque. L'imposition d'un lanceur tri-étage faisait bien partie des exigences du client. De même, il a été imposé d'utiliser le même moteur pour les premier et deuxième étages pour des raisons de réduction du coût de production. Ces exigences sont appelées « exigences de conception ». L'intérêt du client n'est pas de les multiplier car ces exigences réduisent de plus en plus les possibilités d'optimisation et enlève progressivement ses responsabilités au fournisseur.

Dans des cas très particuliers, un client peut être amené à réaliser lui-même toute la conception et à ne sous-traiter que la réalisation. C'est ce que l'on appelle dans notre jargon français du « build to print ». Certains instruments scientifiques peuvent être développés de cette manière parce qu'ils sont très nouveaux et que le client s'autorise des essais et erreurs avant de figer leur définition. Sur SPOT 1, le client CNES avait poussé très loin la définition du télescope haute résolution HRV (High Resolution Visible), puis il avait passé à Matra un contrat de réalisation sur plan. Mais, en règle générale, cette méthode est de moins en moins utilisée car elle n'engage pas la responsabilité du fournisseur. C'est pour lui plus une obligation de moyens qu'une obligation de résultats, sans aucun engagement sur les coûts. Une bonne spécification système se doit de définir clairement les limites du projet. Ce n'est pas toujours évident. Pour le développement de SPOT, la difficulté a été de préciser ce que le système livrerait. Bien sûr, il devait livrer des images, mais quelles images précisément ? On peut imaginer toutes sortes de traitements qui peuvent s'appliquer en fonction de l'utilisation. Les utilisateurs potentiels des images avaient été consultés mais ils n'avaient pas de réelle expérience et leurs exigences n'étaient pas bien arrêtées, ni pour le choix des bandes spectrales, ni pour les traitements à réaliser. La spécification système se devait d'être plus précise sinon les risques de dépassement financier et de glissement du calendrier auraient été importants. Le projet a défini lui-même les bandes spectrales des prises de vue et décidé de ne livrer que des images brutes, seulement corrigées des erreurs du système (effets dû aux petits défauts de la stabilisation du satellite principalement), mais aucune correction liée à l'utilisation. C'est l'entreprise de commercialisation des images, Spotimage, qui en a proposé ultérieurement, mais pas le projet de développement mené par le CNES. A l'usage, les bandes spectrales de SPOT 1 ont été appréciées des utilisateurs et ont été reprises pour les SPOT suivants.

Outre les exigences de performances et de conception, une bonne spécification technique doit aussi contenir ce que le client exige en matière de démonstration de la tenue des exigences par le produit. La règle est qu'à toute exigence doit correspondre une démonstration par laquelle on montre que le produit la satisfait. Les démonstrations peuvent être faites de différentes façons : très classiquement par des essais au sol et on définit alors les conditions d'essais ou des essais en vol et on définit le nombre d'essais et leurs objectifs (démonstration puis qualification) car le coût d'un développement est très directement dépendant de ce nombre (à noter que dans le cas d'un satellite, il n'y a pas d'essai en vol au sens d'essai de développement puisqu'à son arrivée en orbite, on ne peut plus intervenir sur lui et on ne peut que lui demander d'entamer sa vie opérationnelle) ; les démonstrations peuvent être apportées aussi au travers de calculs ou de modélisations qui sont de plus en plus employées de nos jours ; les démonstrations peuvent encore être faites par comparaison avec des produits très similaires développés sur d'autres programmes et employés dans le même domaine (il ne faut pas oublier ce dernier point. Avoir oublié le domaine d'emploi de la centrale inertielle a coûté l'échec du premier vol d'Ariane 5. Ariane 4 et Ariane 5 utilisaient la même centrale mais sur des trajectoires de caractéristiques différentes, celles d'Ariane 5 étaient beaucoup plus tendues car le lanceur accélérât bien plus fortement au décollage). Les exigences d'essais amènent à définir les modèles de développements souhaités par le client. Très classiquement sur un satellite, on réalise une maquette mécanique et thermique, c'est-à-dire représentative du comportement réel du satellite de vol dans les domaines de la mécanique et de la thermique. On réalise aussi une maquette électrique qui est représentative de tous les systèmes électriques et de leur fonctionnement. Dans le passé on réalisait un modèle de qualification du satellite conforme au modèle de vol mais interdit de vol, après avoir subi les épreuves et essais de qualification, généralement plus sévères que les essais de recette. Aujourd'hui, on opte pour la réalisation d'un modèle « protoflight », c'est-à-dire que l'on fait subir au modèle de vol les essais de qualification. Cela aboutit à un développement moins coûteux. Il va de soi qu'une spécification technique de produit et ses documents applicables tels les spécifications générales sont signés par le client et le fournisseur et deviennent des documents annexés au contrat qui les lie.

Pour information et à titre d'exemple, voici le sommaire de la spécification du satellite Spot 1

1. **Objet – Domaine d'application**
2. **Arbre des spécifications SPOT**
3. **Exigences relatives au système SPOT**
  - 3.1 Objectifs généraux de la mission
  - 3.2 Exigences relatives à l'acquisition et à la production d'images
    - 3.2.1 exigences générales
    - 3.2.2 définition des référentiels de base utilisés
    - 3.2.3 caractéristiques de prise de vues
    - 3.2.4 modes de prises de vues et de transmission
    - 3.2.5 images produites par le système SPOT
    - 3.2.6 spécifications de qualité des images produites
    - 3.2.7 liaison image satellite sol
  - 3.3 Exigences relatives à la mise en œuvre du système SPOT
    - 3.3.1 phases de fonctionnement avant lancement, lancement, acquisition,..
    - 3.3.2 orbite SPOT
    - 3.3.3 système de lancement utilisé
    - 3.3.4 performances des liaisons de contrôle satellite sol
  - 3.4 Définition du système SPOT
  - 3.5 Exigences opérationnelles du système SPOT

- 3.5.1 durée de vie des matériels de bord
- 3.5.2 fiabilité; disponibilité
- 3.5.3 sauvegarde
- 3.5.4 contraintes d'utilisation opérationnelles avant lancement
- 3.5.5 contraintes d'utilisation opérationnelles en orbite
- 3.5.6 maintenance
- 3.5.7 interchangeabilité; rechanges
- 3.5.8 transport et manutention
- 3.5.9 stockage des matériels de bord
- 3.5.10 stockage et durée de vie des matériels sol
- 3.5.11 environnement au sol et en orbite
- 3.6 Interfaces
  - satellite/système de lancement; système/réseau de stations bande S;
  - satellite/segment sol image; segment sol SPOT/service utilisateur;
  - système SPOT/stations image étrangères; satellite SPOT/porteur
- 3.7 Règles générales de conception et de fabrication
  - 3.7.1 standards de fabrication
  - 3.7.2 sélection des composants et matériaux
- 3.8 Disciplines de conception
  - 3.8.1 structure et thermique
  - 3.8.2 systèmes électriques
  - 3.8.3 systèmes pyrotechniques
  - 3.8.4 E.M.C
  - 3.8.5 contamination-propreté
- 4. Essais**
- 4.1 Généralités
- 4.2 Les essais système
  - recette en vol; recette au sol de la chaîne image;
  - compatibilité bord/contrôle sol et bord/sol image
  - validation des procédures opérationnelles;
  - essais de programmation des prises de vues
- 4.3 Les essais du satellite

## 6. Les revues, points d'étapes, points clés...

Chaque projet institue des revues ou points d'étapes pour un certain nombre de produits. Ces rendez-vous ont lieu au moment de figer la définition, avant les essais de qualification, avant de fabriquer le premier article de la série...

La mise en place de revues formelles au cours du développement d'un produit est très caractéristique des techniques de management mises en application dans le spatial et l'aéronautique. Cette méthodologie, malgré sa lourdeur, apporte une rigueur et une transparence tout à fait utiles au succès de développements longs et coûteux. Bien entendu, comme dans tout système de gestion, il peut s'introduire quelques « perversités » qui font décroître l'intérêt de la méthode. Nous allons en parler.

Les revues sont, d'abord, des rendez-vous où on doit se remettre en cause honnêtement et il n'est donc pas anormal que soient mises en évidence des faiblesses, des impasses, des insuffisances. S'il s'agit d'une revue en amont du développement, une modification de conception peut être débattue et acceptée. Si le développement en est au stade des essais de qualification, les séquences d'essais et leur complétude peuvent être remises en cause, etc...

### Le déroulement des revues :

Pour chacune des revues, la marche à suivre est la suivante :

- a) **l'organisateur de la revue** est le responsable du produit en développement, mais la revue implique son client et, si nécessaire, le ou les client(s) de son client
- b) l'organisateur de la revue propose la constitution d'un **groupe de revue**, dirigé par un président de revue, dont la composition est formellement approuvée par le client. Ces membres agissent en leur nom propre, c'est-à-dire qu'ils n'engagent pas les entités auxquelles ils appartiennent. La compétition entre industriels pousse parfois certains fournisseurs à ne pas tout dire lors des revues si des représentants de la concurrence sont membres du groupe de revue. Il est important de tenir compte de ce facteur dans la nomination des membres.  
Lorsqu'on est en amont du développement, dans la phase de définition, il est intéressant de nommer des membres connaisseurs de la discipline concernée mais n'appartenant pas au projet. Mais cette règle d'indépendance est presque impossible à mettre en œuvre lorsque les revues se situent dans les phases de qualification et de production. En effet, lorsque le développement est largement entamé et que son historique est long et complexe à assimiler, des membres extérieurs ne peuvent aisément émettre des avis fondés et pertinents dans le délai relativement court du déroulement des revues.
- c) **la documentation** requise doit exister au démarrage de la revue. Ce n'est d'ailleurs pas un des moindres mérites d'une revue que de faire sortir une documentation complète et lisible, telle qu'attendue au stade du développement correspondant à la revue.
- d) **Une réunion de démarrage** a lieu où l'équipe de projet présente au groupe de revue le produit, ses finalités, l'état de son développement, le contenu de la documentation et les points difficiles.
- e) Le groupe de revue analyse la documentation, évalue la situation du développement et formule ses remarques par écrit au travers de **fiches d'études des problèmes soulevés (FEPS)**. Le groupe de programme répond par écrit à ces fiches.
- f) Après ces échanges avec l'équipe de projet, le groupe de revue décide ou non de transformer ses remarques en **recommandations**. Il faut bien avoir à l'esprit qu'un groupe de revue n'a qu'un pouvoir de recommandation et non de décision. Son rôle s'arrête à la rédaction d'un rapport de revue contenant des recommandations.

- g) C'est au groupe de projet de décider au vu des recommandations des actions à conduire en prenant en compte leurs impacts sur les performances techniques, sur les délais et sur les coûts. Ceci se fait lors d'un **Comité Directeur** de la revue au cours duquel l'équipe de projet en charge du produit soumet à son client le plan d'action en présence du président du groupe de revue. Le plan d'action en sort approuvé.
- h) L'équipe de projet organise le **suivi des actions** du plan jusqu'à la clôture de toutes les actions

Voilà pour la méthode. Mais au-delà, je voudrais insister sur quelques points relatifs au contexte et à l'esprit des revues.

Dans les relations contractuelles client-fournisseur, les revues de projet sont devenues, sans doute par commodité, des étapes contractuelles associées à des paiements importants. Cela pousse l'industriel fournisseur à considérer ces revues comme un examen de passage qu'il doit impérativement réussir et en conséquence il peut être tenté de ne pas tout dire ou de ne pas tout montrer. Au contraire le client cherche à profiter de l'effet de pression de cette étape contractuelle pour imposer ses vues, mais il se peut que ses solutions ne soient pas les meilleures.

On peut faire de la remise de la documentation d'une revue une étape de paiement, mais certainement pas du « bon » achèvement d'une revue. Il est évident que l'appréciation du déroulement d'une revue est trop subjective pour être retenue comme étape de paiement.

Un groupe de revue a aussi tendance à faire beaucoup de zèle en produisant beaucoup de FEPS et de recommandations. On entend dire souvent qu'une revue a été bonne parce qu'il y a eu des centaines de fiches et des dizaines de recommandations. Mais, ce qui importe n'est pas leur nombre mais leur qualité et leur contribution au succès du programme. Malgré le nombre, il faut toujours s'interroger s'il n'y a pas un problème oublié qui conduira ultérieurement à un problème en vol ou en orbite ? On ne cherche pas à corriger les fautes d'orthographe de la documentation, mais suivant la phase de développement, à retoucher la définition, la séquence des essais de qualification ou les opérations de production d'un produit « livrable et recetable ». C'est le produit qui est important, pas sa documentation associée.

Je reproche actuellement la tendance à faire des revues une fin en soi alors qu'elles ne sont que des outils et que leur finalité est le développement d'un produit répondant à ses exigences, dans les délais et dans les coûts.

Autre point touchant la différence entre pouvoir de recommandation et pouvoir de décision : le groupe de revue dispose du premier et le projet, à la fois l'équipe cliente et l'équipe fournisseur, du second. Bien évidemment, la règle de base du Comité Directeur d'une revue est de décider au maximum dans le sens des recommandations émises par le groupe de revue. Mais, dans certain cas, il peut ne pas donner suite, car le groupe de revue n'a pas toujours tous les éléments pour établir ses recommandations et notamment la contrainte financière ou budgétaire ou encore certaines considérations politiques. Le périmètre d'action d'un groupe de revue est volontairement limité aux aspects de performances techniques et de méthodes de qualification et de production.

Je donne un exemple. Il existe des programmes où les spécificateurs n'ont aucune responsabilité budgétaire. C'est le cas pour les programmes européens liés à la station internationale. La NASA, et aussi l'agence spatiale russe, définissent les règles qui s'appliquent aux éléments développés par leurs partenaires européens, japonais ou canadiens mais n'ont aucune responsabilité financière dans le développement de ces éléments. Lors des revues, il est logique que des Américains et des Russes soient membres du groupe de revue. J'ai connu le cas caricatural où, à l'issue d'une revue de l'ATV, véhicule cargo construit par les Européens, lancé par Ariane et transportant du fret à la station, les

représentants américains ont recommandé une certaine norme de qualité pour l'eau transportée et les représentants russes une autre, incompatible bien sûr de la première. Le mélange des eaux issues des deux normes faisait, paraît-il, précipiter des sels d'argent ! Aucun de ces spécificateurs n'a souhaité modifier sa demande et, en définitive, l'Agence Spatiale Européenne a pris la décision de dépenser environ 2 M€ pour obtenir cette double compatibilité. Pour moi, elle aurait dû refuser et exercer son pouvoir de décision que lui confère sa responsabilité budgétaire et non accéder aux recommandations de ses collègues, fussent-ils prestigieux. Il n'est pas étonnant alors que ces projets dépassent leurs enveloppes budgétaires.

Je souhaite insister aussi sur le caractère temporaire d'une revue. Suivant l'ampleur de la tâche et le degré d'innovation du produit soumis à revue, celle-ci peut durer d'une semaine à un mois, un mois et demi. Je considère que les revues qui s'installent sur plusieurs mois voire définitivement sont à proscrire. Elles ne peuvent que se substituer à la hiérarchie des équipes de projet définie par l'Organigramme Technique. De deux choses l'une, ou cette organisation n'est pas satisfaisante et il faut la modifier, ou elle l'est et il est inutile de créer en parallèle une autre hiérarchie qui, de toute évidence, déresponsabilise les équipes de projet.

Enfin, il faut insister sur l'absolue nécessité de suivre les actions décidées et de s'assurer qu'elles aboutissent toutes. Dans la pratique, c'est une lourde tâche, souvent pénible et laborieuse. Trop souvent, les libellés des actions sont flous et mal rédigés. Si l'action tarde à être réalisée, on perd le sens qui avait été donné lors du Comité Directeur et on risque de répondre à côté du besoin exprimé alors. Dans certains cas, le temps passant, les acteurs se modifiant, on en arrive à ne plus comprendre le sens de l'action et de guerre lasse on en vient à l'annuler, ce qui est dangereux car si on avait accepté cette action, c'est qu'il y avait une raison. On ne doit pas annuler d'action sans bonne raison correctement explicitée. La meilleure façon de gérer les listes d'actions est de mesurer leurs progressions de façon systématique lors des réunions d'avancement. C'est une hygiène indispensable !

## **7. La gestion de la définition technique**

Le système et ses composantes se trouvent à un instant donné du développement dans une certaine définition. Nous appelons cela la configuration du système. Celle-ci se modifie au cours du développement d'abord puis ensuite au cours de la vie opérationnelle. C'est inévitable. De petites modifications peuvent avoir d'importantes conséquences qui dépendent de la nature du projet. J'imagine que le changement de la couleur d'une voiture ne modifie pas ses performances, qu'il en est de même pour un tram ou un train à grande vitesse. J'en vois de toutes les couleurs. Mais ceci n'est plus tout à fait vrai pour des avions qui sont généralement –mais pas tous- peints en blanc, sans doute pour des avantages thermiques. Quant aux lanceurs qui attendent sur leurs pas de tir souvent en plein soleil, le blanc s'impose. Pour les satellites, les revêtements extérieurs doivent être choisis avec soin pour assurer le contrôle thermique de l'ensemble du satellite et les changements de peinture ont un impact système évident. Il faut instruire une telle modification avant de l'approuver ou de la rejeter.

On voit sur cet exemple que la gestion de la modification d'une peinture pourra être traitée localement sur une automobile et remontera au niveau système pour un satellite.

Ce qui est important, c'est de formaliser le processus au sein du projet qui permet l'approbation ou le rejet des modifications. Ce processus doit permettre d'analyser les conséquences techniques mais aussi financières et calendaires.

Notons aussi que la définition technique peut être modifiée de deux façons : soit, c'est le standard de référence qui évolue et la modification est appliquée à tous les exemplaires à venir ; soit, c'est une modification acceptée sur un exemplaire. Dans ce cas, on appelle cela une non-conformité. Les processus de gestion des modifications et des non-conformités peuvent être distincts, même s'ils se ressemblent dans leurs principes.

Il va de soi que des non-conformités récurrentes doivent aboutir à une modification qui change le standard de référence.

Une modification (ou une non-conformité) ne concerne que les **matériels (ou logiciels)** contenus dans le système et non leur documentation ou leur maquette numérique associées. Les corrections d'orthographe de la définition de référence ne sont pas des modifications. Même si la maquette numérique sert de référence, les changements dans les outils informatiques de gestion de cette maquette ne constituent pas plus des modifications.

Quelques recommandations pour établir un processus efficace.

1. Il faut appliquer le **principe de subsidiarité**: ne pas faire remonter des modifications qui ne nécessitent qu'un traitement local. Il faut éviter de « noyer » le système. Si le flot des modifications est très important, il y a un risque évident pour le projet. Comment gérer la compatibilité de modifications qui s'appliquent à des rangs différents dans la production ? Cela peut arriver en début de production et nous avons connu ce phénomène au début de la production d'Ariane 5. Cela nous a conduits à faire une pause dans le projet et prendre un peu de retard.
2. La décision doit souvent être prise rapidement au plan technique pour ne pas impacter les délais. Mais la négociation financière adjacente peut retarder la décision. Je recommande de dissocier cette dernière du reste. Une estimation plafond est faite pour toute modification et les négociations financières et contractuelles sont faites par paquets. D'ailleurs, la combinaison de plusieurs modifications peut ne pas être neutre sur leur prix global.

## 8. La gestion des délais

Dans un programme à fort contenu de nouveautés technologiques, les principaux enjeux de la gestion des délais sont :

- . Être capable de cerner la réalité du calendrier des travaux, le planning.
- . Savoir maintenir sur tous les acteurs une pression du planning toujours adaptée, c'est-à-dire en gardant la crédibilité des objectifs fixés.

Nous allons distinguer deux outils : le planning objectif et le planning réel.

### ***Le planning objectif***

Il doit être établi dès le début du projet, voire de l'avant-projet. Il se construit du haut, le système, vers le bas, les produits. Les étapes de ce planning sont les fournitures des modèles de développement, les démarrages et les fins des grands essais, les lancements, les recettes en orbite. Je recommande d'éviter les fournitures de « papier » et de privilégier les fournitures de produits dans le choix des étapes.

L'estimation des durées se fait le plus souvent par similarité avec des programmes précédents. Si on ne dispose pas de références, il faut organiser des études contradictoires entre client et fournisseur. Il ne faut pas exagérer les marges, on ne peut généralement pas se les offrir. Mais, il ne faut pas faire d'impasse d'entrée de jeu, la réalité se vengera inmanquablement au cours du développement.

### ***Le planning réel***

Lorsque l'organisation industrielle et les contrats de développement à tous les niveaux sont en place, chaque contractant a pu bâtir la logique de ses travaux et il est possible de remonter du bas vers le haut le véritable planning. Les résultats sont souvent, pour ne pas dire toujours, catastrophiques ! Il faut alors travailler la logique de développement pour retrouver une situation cohérente avec le planning objectif.

Un des points important est de s'assurer que chaque intervenant a bien fait une analyse détaillée de la logique du déroulement de ses travaux ; qu'il a bien défini les données et matériels nécessaires au démarrage d'une tâche ; qu'il a bien déterminé les conditions d'enchaînements des différentes tâches. Cela doit être totalement cohérent avec les descriptions des travaux contenues dans les propositions et avec les prix qu'il a proposés.

L'assemblage de toutes les logiques permet d'obtenir les chemins critiques et sous critiques, et de les retoucher jusqu'à déterminer des logiques compatibles des objectifs. C'est toujours possible au démarrage.

Il faut éviter de recourir dès le début du développement à des travaux en doubles équipes (encore moins triples), aux fameuses « task forces ». Ce doit être réservé au cours du développement à des travaux bien précis et limités en cas de coup dur.

Il existe bien sûr des outils pour établir le planning réel, il faut s'en servir mais ce ne sont que des outils. Ce sont les équipes de projet qui peuvent trouver les changements de logique qui ramène le planning dans les limites voulues.

Au cours de l'avancement du projet, il faut suivre l'évolution du planning. Des réunions formelles client-fournisseurs doivent être mises en place. Je recommande d'en tenir trois par an.

Elles ont deux objectifs :

1. Connaître la situation réelle du planning. Les outils planning sont supposés la donner, mais il faut toujours s'interroger sur la sincérité des données d'entrée. Les fournisseurs n'aiment pas afficher leurs retards... Une analyse d'ingénieur est indispensable pour débusquer les retards cachés. S'ils sont mis en évidence, il faut agir rapidement au plus haut niveau du contractant concerné. Il faut être intraitable avec un fournisseur qui sciemment masque ses retards. C'est rompre la confiance entre client et fournisseur. Cela peut entraîner la demande par le client au fournisseur de changer son chef de projet, voire de recourir à un autre fournisseur si c'est possible.
2. Décider des actions correctives. La règle de base est de **refuser de modifier le planning objectif** et de définir une nouvelle logique qui annule les retards.

Cependant, lorsqu'il devient évident que les objectifs ne pourront jamais être satisfaits, seul le chef de projet du client (le plus haut niveau dans la hiérarchie du programme) peut redéfinir les nouveaux objectifs. Ceux-ci doivent rester **ambitieux mais crédibles**.

Bien évidemment, quand on arrive à la fin du développement, les changements de logique sont presque impossibles à mettre en place. Le planning devient un enchaînement de tâches linéaire. La qualité des travaux devient prioritaire face à la tenue du planning.

En phase de production, les deux points importants sont :

1. La réduction du cycle de fabrication, synonyme de réduction des coûts.



2. Le masquage des approvisionnements à longs délais. Cela peut se faire par anticipation de commandes, réduction des délais, voire quelques prises de risques ...

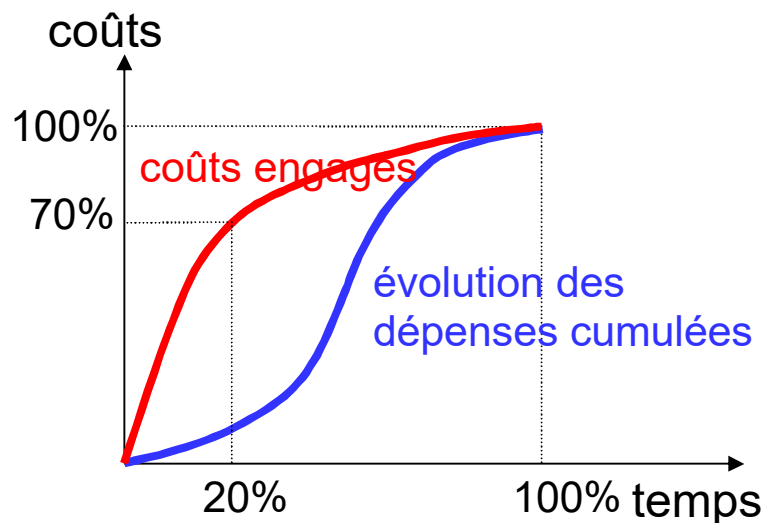
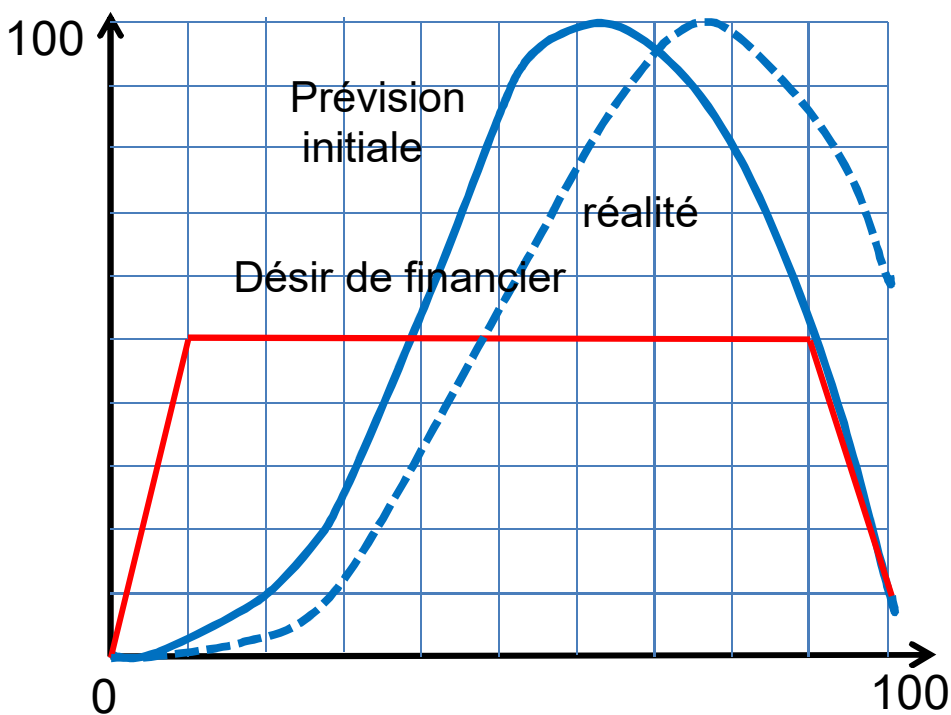
## 9. Gestion des Coûts

Quelques rappels incontournables:

La courbe des dépenses est en cloche. Généralement, la montée en puissance est plus lente qu'espérée, et il est difficile de faire décroître les dépenses en fin de développement aussi rapidement que souhaité. Les financiers détestent cette courbe en cloche. Ils aimeraient des financements plats ou croissants vers la fin, mais toujours étalés dans le temps.

Les engagements sont très importants très rapidement. Les dépenses présentent un fort décalage par rapport aux engagements.

Courbe des dépenses d'un projet en développement fonction du temps

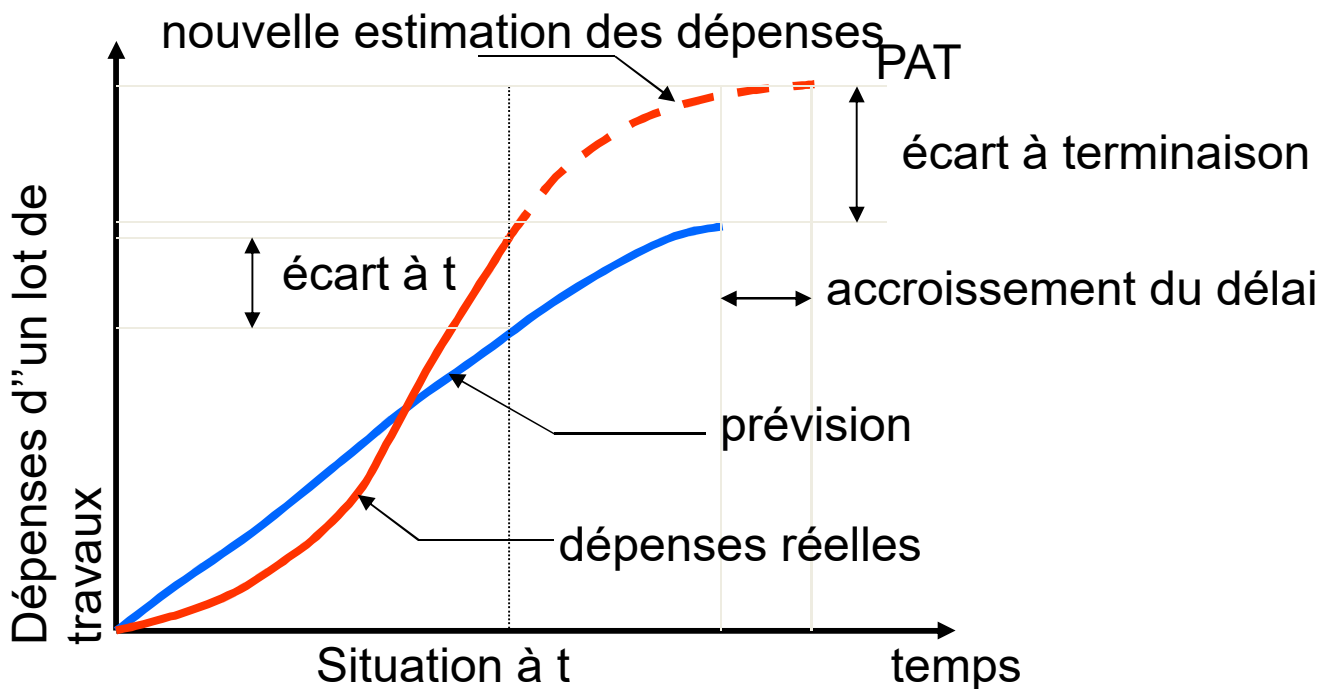


Un grand projet a une inertie « industrielle » importante. La production qui suit le développement ne requiert que des équipes plus limitées et dont les profils sont différents de celles du développement.

S'il existe des suites au développement, notion de filière (après Ariane 1, il y a eu des évolutions constantes pour adapter au mieux le lanceur à son marché ; SPOT 1 a eu des suites nombreuses: des petits frères jusqu'à SPOT 7 ; ERS, Earth Remote Sensing, satellite de l'Agence Spatiale Européenne ; Helios, satellite de reconnaissance militaire français ; Envisat satellite d'observation de l'ESA...), la difficulté se résout assez facilement. Dans le cas inverse, c'est bien plus dur. Demander à la NASA ce qu'elle a fait des effectifs affectés au Shuttle lors de l'abandon du projet. Elle les a investi chez Space X et Orbital, sociétés privées qu'elle a largement soutenues.

Il est possible de modifier la forme de la courbe par de l'ingénierie financière, mais on augmente le coût à l'achèvement, parce que les équipes sont présentes plus longtemps. En fait, on ne diminue pratiquement pas les engagements, on étale seulement les dépenses.

Chaque projet doit gérer ses coûts de façon régulière (tous les trimestres semble être un bon rythme). Il s'agit de recalculer le prix à terminaison (PAT) de chaque lot de travaux. Ce travail assez délicat est du ressort du projet et non du contrôle de gestion de l'entreprise qui peut y contribuer en fournissant l'écart au temps t entre prévision et situation réelle, mais n'a pas la connaissance technique qui permet d'estimer les retards et les surcoûts à terminaison. C'est aussi le projet qui peut décider des actions correctives en vue de réduire les risques de dérapage financier et planning.



Lors du développement du lanceur Ariane 1, je gérais le contrat Architecte Industriel passé à Aerospatiale. Il y avait 20 lots au contrat et chaque mois je recevais pour chacun des lots la nouvelle courbe. Le contrat était passé en régie. Ma réaction était immédiate si la courbe réelle s'écartait un tant soit peu de la prévision et des solutions correctives étaient aussitôt mises en place. Les coûts ont été tenus.

## 10. Les essais

Même si de nos jours les simulations sont de plus en plus représentatives de la réalité et de plus en plus performantes, il est difficile de se passer d'essais de qualification ou de recette.

Ici, je veux parler des essais d'ensemble ou d'importants sous-ensembles. Les essais d'équipements sont classiques et bien maîtrisés. Ils ne me semblent pas comporter de difficultés particulières.

Pour les ensembles et sous-ensembles, le coût des essais et leur délai de réalisation méritent notre attention. Les moyens d'essais peuvent être lourds. Par exemple, un banc d'essais de moteur de lanceur est une installation importante et coûteuse. Il doit être mis en place dès le démarrage du projet et c'est en réalité le premier investissement d'importance d'un nouveau programme de lanceur. C'est une réalisation qui se situe généralement sur le chemin critique du planning du projet, sauf si elle a été effectuée au cours d'un avant-projet précurseur. Un autre moyen d'essais d'un lanceur ou d'un satellite est ce qu'on appelle un « banc de contrôle ». C'est le moyen qui met en œuvre le lanceur ou le satellite sur le pas de tir pour le préparer au lancement. Des matériels très similaires servent aussi pour opérer le satellite en orbite tout au long de sa vie opérationnelle. Une autre difficulté se présente ici. La réalisation de ces moyens requiert une bonne définition de l'objet à contrôler et celle-ci n'est obtenue qu'au fur et à mesure du développement. Il est alors difficile de disposer en temps voulu d'un moyen de contrôle disponible au temps souhaité. Ceci vaut bien sûr essentiellement pour les projets « premiers de cordée » alors que pour les autres la notion de filière résout la difficulté.

Je recommande fortement des essais de chaînes fonctionnelles (chaîne de guidage pilotage d'un lanceur, chaîne de contrôle d'attitude et d'orbite d'un satellite, chaîne image d'un satellite) effectués de bout en bout (end to end en anglais), c'est-à-dire en rassemblant tous les éléments qui participent à la chaîne considérée. Ce n'est pas toujours possible. On ne peut pas par exemple simuler au sol l'accélération subie par les accéléromètres de la centrale inertielle d'un lanceur, mais on peut intégrer dans l'essai toute l'électronique de la centrale. C'est ce qu'il faut faire. Nous l'aurions fait sur Ariane 5 et l'accident du premier vol d'essai aurait été évité. Nous l'avons réalisé seulement quatre jours après l'accident et l'erreur (stupide bien entendu) est apparue immédiatement.

La NASA a qualifié au sol le télescope de la mission Hubble en s'y prenant par parties. Il faut dire que qualifier un aussi grand télescope n'est pas chose facile. Il faut un collimateur, un télescope inverse dont les qualités optiques sont meilleures d'un ordre de grandeur que l'objet à tester. Un tel collimateur est par conséquent extrêmement onéreux. Il en existe un aux Etats-Unis, mais il appartient à l'Air Force et sert à la recette des satellites militaires de reconnaissance. Les relations de la NASA et de l'Air Force ne sont pas toujours radieuses, d'où le recours à la qualification par parties. Celle-ci a abouti à un bon résultat à l'échelle des microns, mais il y avait une erreur de 2 mm passée inaperçue. Arrivé en orbite, on s'est aussitôt rendu compte que le télescope était myope. Il a fallu une mission navette à un milliard de Dollars pour corriger le défaut. C'est plus que le prix d'un collimateur même extrêmement coûteux !

Personnellement, j'ai été très content d'un test complet de la chaîne image de SPOT 1. Cet essai n'avait pas été prévu au départ du projet, mais en examinant toutes les transformations faites à bord du satellite du signal image, depuis l'entrée des photons dans l'instrument optique jusqu'à la réception du message numérique contenu dans la télémesure émise par le satellite, je tenais à voir le résultat sur des éléments réels. Lorsque j'ai posé la question de la réalisation de cet essai, le responsable système du projet au CNES et l'industriel en charge ont suivi et ont mis sur pied un essai au sol de toute la chaîne. IL a fallu faire tourner le télescope en l'installant sur un plateau tournant sur le toit d'un bâtiment. Il regardait le paysage à seulement quelques kilomètres alors qu'il est réglé pour

se situer à 832 Km de sa cible. L'image n'était pas calibrée non plus et n'était donc pas parfaite. Mais nous avons pu vérifier que les pixels reçus étaient bien dans l'ordre attendu et formaient une image lisible dont les défauts étaient tous explicables. Soulagement...

Dans les projets spatiaux, il n'existe pas d'organisme de certification qui impose des règles strictes. Ce sont les clients qui mettent en place les processus de qualification et de recette. Ils doivent déterminer les types d'essais, leur nombre... Au fur et à mesure des progrès des simulations, le nombre d'essais peut décroître. Le développement du missile balistique M4 contenait 14 tirs de qualification et celui du missile M51 seulement 4.

Pour tous ces essais, je vous propose de suivre le mieux possible le précepte des Américains : **TEST AS YOU FLY, FLY AS YOU TEST**. Recensez scrupuleusement les dérogations à cette règle si vous êtes contraints malgré vous de les accepter.

La qualification d'un système se fait toujours par rapport à un domaine d'emploi. Si ce domaine change, une requalification s'impose. Lorsque la Russie a commercialisé le lanceur Proton, il y a eu plusieurs échecs dus à l'emploi du lanceur sur des trajectoires différentes du domaine de qualification. Je me souviens d'une mission où le dernier étage n'a pas été ré-allumé parce que les conditions thermiques ont abouti au gel d'un des ergols dans sa canalisation. Cet étage avait parfaitement fonctionné auparavant de nombreuses fois, mais sur d'autres orbites.

Je conseille fortement de concevoir des chaînes fonctionnelles basées sur des processus déterministes (logiciels inclus). Seul un fonctionnement déterministe permet de tester tous les chemins possibles dans un temps limité. Pour les chaînes critiques du point de vue de la sécurité, cette précaution me semble même absolument nécessaire. Je suis conscient que les processeurs actuels ne vont pas dans ce sens. Ils ont des fonctionnements aléatoires. Mais, au prix d'un ralentissement des calculs, on peut rendre, malgré tout, les chaînes qui les incorporent déterministes. Quant à l'emploi des outils d'intelligence artificielle, le problème majeur qu'ils soulèvent est bien de trouver les méthodes de qualification qui aboutissent à prouver qu'ils introduisent un taux d'erreur négligeable, à défaut de certitude absolue. Je laisse aux nouvelles générations le soin de résoudre ce problème difficile qui se cumule avec les exigences à venir sur la cybersécurité.

## Conclusion

La réussite d'un grand projet tient à de nombreux facteurs, mais je pense que les plus importants sont:

- Une bonne structuration du projet, de sa chaîne de commandement et de bonnes relations avec les financeurs. L'organisation doit être bien comprise par tous les acteurs.
- Des exigences (spécifications) complètes et établies dans de bons délais, comprises et acceptées par toutes les parties.
- Des responsables de projet à tous les niveaux qui disposent de la confiance de leurs directions, qui agissent de façon transparente et sincère pour la réussite du projet. De plus, ce n'est pas du tout inutile qu'ils soient compétents...

A tout instant du projet, dans l'établissement des spécifications, dans la perception des points durs qui peuvent impacter les délais et les coûts, vous noterez que malgré les outils de gestion de plus en plus performants et utiles, le « jugement de l'ingénieur » reste indispensable.

Cela fait d'un grand projet une aventure humaine extraordinaire. C'est ce qui rend les grands projets si attirants même s'ils ont une fâcheuse tendance à absorber la totalité de l'emploi du temps de leurs acteurs. Au bout, il y a toujours une extraordinaire récompense. Je me rappelle l'ambiance de Kourou après le succès du premier vol d'Ariane 1. Je me souviens aussi de l'émotion qui nous a étreints lorsque nous avons restitué la première image de SPOT 1. C'était le port de Hambourg en plein hiver. Les bateaux créaient des chenaux dans la glace. Dans un cas comme dans l'autre, c'était la récompense de huit années d'efforts !

Depuis le premier vol d'Ariane, il y a eu plus de 250 lancements d'Ariane 1 à 5. SPOT 1 a créé en Europe la filière d'observation de la Terre. Chaque participant à ces grands projets novateurs peut dire avec fierté : « J'en étais ».