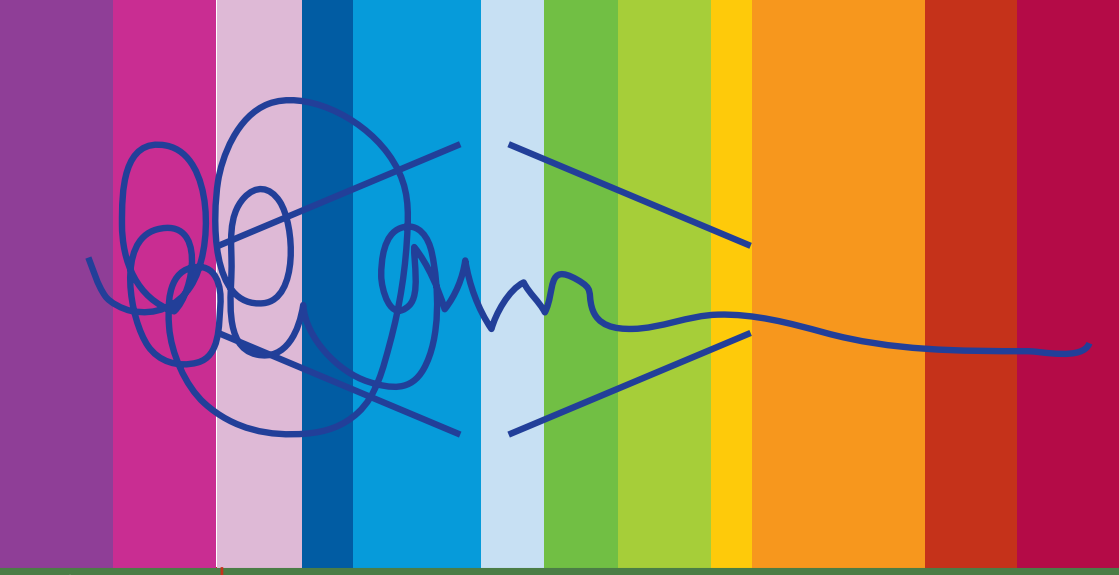


cnes | Les cahiers d'exploration « Espace, Innovation, Société »

CHEMINS ET TEMPORALITÉS DE L'INNOVATION

Les processus d'exploration de la valeur

numéro 2

Les cahiers d'exploration « Espace, Innovation, Société »

CHEMINS ET TEMPORALITÉS DE L'INNOVATION

Les processus d'exploration de la valeur

numéro 2

Publication du CNES, réalisée par Cathy Dubois (Rudy&Dubois Consultants), création graphique et réalisation Isabelle Benoit – Décembre 2016

Sommaire

La préoccupation du CNES : décider face à l'incertitude du futur 7
Michel Faup, Claude Fratter, Michel Avignon et Cathy Dubois

Présentation des chapitres 10

Valorisation des dispositifs spatiaux : de l'estimation préliminaire à la réalisation effective 13
Sylvain Lenfle et Christophe Midler

Faire enquête 21
Mathias Béjean

L'étrangeté des projets d'exploration 37
Sylvain Lenfle

À la rencontre des usages opérationnels : le long chemin des radiances 69
Sylvain Lenfle

Renouveler le dominant design : histoire du changement de méthode d'assimilation des données pour la prévision numérique du temps 111
Sylvain Lenfle

La préoccupation du CNES : décider face à l'incertitude du futur

En 2016, la mise en place de la Direction de l'Innovation, des Applications et de la Science – et dans ce contexte, des nouvelles équipes Innovation et Prospective et Paso (Plateau d'Architecture des Systèmes Orbitaux)- fournit un nouveau cadre à la réflexion sur les processus qui transforment *une idée* en usage opérationnel.

Pour les managers du CNES, il s'agit de laisser place à plus de créativité, de réactivité et d'innovation et de faire évoluer les approches, notamment dans les processus d'avant-projet et de projet. Globalement, les acteurs du spatial sont invités à articuler étroitement les activités spatiales aux rythmes et aux enjeux de la société. Pour cela, il leur faut : Repérer les problématiques de la société pour lesquelles le spatial peut-être un atout. Anticiper les conditions de sa pertinence. Favoriser la rencontre entre une mission qui n'existe pas encore et un usage qui n'existe pas non plus, notamment lorsque les leviers d'émergence de ces usages dépendent d'autres acteurs que ceux du spatial. Animer ce cheminement collectif.

Le moment semblait donc venu de partager les recherches réalisées dans le cadre du programme «*Espace, innovation et société*». Dans un contexte caractérisé par l'exigence accrue de la part de l'État d'un retour sur investissement, par la dégradation des finances publiques, par des interrogations récurrentes sur le futur de l'exploration spatiale et en même temps par la multiplication des applications potentielles du spatial, l'appui d'équipes de recherche en gestion a été sollicité pour revisiter la trajectoire d'innovation de l'agence depuis sa création et étudier l'organisation des processus d'innovation.
Si l'on considère *la valeur du spatial* à l'aune de *la capacité des dispositifs spatiaux à être des ressources pour des problèmes contemporains,* l'innovation a pour objectif d'aider à définir cette valeur potentielle et à la concrétiser. Ce programme a pris pour acquis que depuis sa création en 1961, le CNES avait su être un acteur innovant et être l'initiateur de grandes réus-

sites spatiales françaises et européennes (Ariane, Arianespace, Argos, Spot, Topex-Poséidon…). Dès lors, à partir d'un examen de l'histoire du CNES, les recherches ont pour but d'identifier et d'étudier les *processus réellement déployés dans des cas précis* afin de comprendre les ressorts ou les freins de la capacité d'innovation.

Comme l'organisme n'a ni la légitimité institutionnelle ni les compétences pour travailler isolément sur ses missions, les recherches se sont intéressées aux modalités de dialogue et de coopération entre celui-ci et ses partenaires, aux modalités de pilotage de l'innovation, et à la manière d'apprécier, d'orienter la contribution sociétale des dispositifs spatiaux.

L'étude de missions passées considérées comme profondément innovantes a montré que le CNES pouvait être décrit comme *un organisme innovant qui dans certains contextes bloquait ses propres capacités d'innovation*. En effet, des règles, telles que celles visant la maîtrise des risques en termes de performance de sécurité, de coût et de délais, qui pouvaient constituer des appuis essentiels pour l'action collective, devenaient de véritables verrous lorsqu'elles étaient perçues comme des règles universelles indépendantes des problèmes à résoudre. Les chercheurs ont fait l'hypothèse que « *en situation, certains acteurs inventent des pratiques conciliant des contraintes apparemment antagonistes* ». Ce sont ces pratiques qu'il s'agissait de repérer et d'analyser finement et dans la longue durée.

Ce cahier rassemble des travaux de Sylvain Lenfle, professeur en management de l'innovation au Conservatoire national des arts et métiers de Paris et de Mathias Béjean, maître de conférences en management et design de l'innovation à l'université Paris-Est Créteil.

Dans le premier chapitre, **Valorisation des dispositifs spatiaux : de l'estimation préliminaire à la réalisation effective**, Sylvain Lenfle revient sur la question de la valorisation des dispositifs spatiaux en montrant l'évolution historique du problème. Il remarque que dans une première période, la mission de l'agence est définie dans le cadre d'un mandat explicite porté par une tutelle ; mais que, progressivement, il lui faut avoir l'intuition de besoins diffus et implicites portés par une multiplicité d'acteurs sociaux aux existences institutionnelles variées.
Mathias Béjean propose dans le deuxième chapitre, **Faire enquête,** de conceptualiser et de structurer, les enquêtes réalisées par les ingénieurs du CNES pour y parvenir.

Avec le chapitre trois, **L'étrangeté des projets d'exploration**, Sylvain Lenfle analyse les solutions mises en place dans le cadre des projets de télécommunication pour être agiles et prendre en compte les changements susceptibles d'intervenir durant leur temps de mise en œuvre. Cette enquête débouche sur une réflexion sur le management des projets selon les finalités qu'ils poursuivent.
L'articulation de la temporalité des projets spatiaux avec celles des espaces d'usage fait l'objet des chapitres quatre et cinq qui retracent l'épopée de l'assimilation des radiances pour la prévision numérique du temps. Le chapitre quatre, **À la rencontre des usages opérationnels : le long chemin des radiances,** adopte le point de vue des acteurs du spatial. Le suivant, propose de se décentrer et d'entrer dans les préoccupations des acteurs de la prévision numérique du temps afin d'appréhender leurs questionnements et leurs efforts pour aboutir à l'usage opérationnel.

Ces recherches mettent à jour des pratiques innovantes des acteurs. Sylvain Lenfle et Mathias Béjean analysent chemin faisant ce qui dans les normes managériales instituées pour servir d'appui, se transforme en frein voire en obstacle. L'un et l'autre puisent dans le corpus de leurs disciplines et dans leurs expériences de chercheur, des concepts et des références utiles pour tous ceux qui souhaiteraient réfléchir sur leur activité.

Michel Faup, Claude Fratter, Michel Avignon et Cathy Dubois

Présentation des chapitres

✹ VALORISATION DES DISPOSITIFS SPATIAUX : DE L'ESTIMATION PRÉLIMINAIRE À LA RÉALISATION EFFECTIVE

Sylvain Lenfle et Christophe Midler sont chercheurs au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.
Ce chapitre reprend la synthèse de travaux réalisés en 2011. Les chercheurs mobilisent la notion de mandat et les théories de la conception innovante pour mettre en perspective comment, sous l'impulsion du CNES, la France, puis l'Europe, sont devenues des puissances majeures de l'industrie spatiale. Cette montée en puissance s'est faite dans le cadre d'usages largement définis par les États-Unis après la seconde guerre mondiale, puis s'est affinée grâce aux progrès scientifiques et techniques. Elle a rencontré des limites à la fin des années quatre-vingt-dix quand la multiplication des programmes et les exigences de plus en plus complexes des pouvoirs publics ont conduit le CNES à une crise financière. L'organisme est alors confronté à la question du renouvellement des applications du spatial et de leur extension hors des domaines historiques que sont la défense, la météorologie et les télécommunications. L'exploration des « applications spatiales innovantes » soulève de nouveaux problèmes. L'analyse des forces et des faiblesses des outils mis en place pour sortir de la crise des années quatre-vingt-dix (méthode « atouts-attraits ») montre la difficulté pour un organisme, à mener de front la poursuite de son développement dans ses domaines d'excellence historiques et l'exploration de nouveaux usages pour lesquels les demandes sont confuses ou inexistantes et les compétences encore à construire.

✹ FAIRE ENQUÊTE

Mathias Béjean est Maître de conférences à l'Université Paris-Est Créteil, chercheur à l'Institut de Recherche en Gestion de cette université et responsable d'enseignements à l'École nationale supérieure de création industrielle ENSCI-Les Ateliers.

Dans ce chapitre, Mathias Béjean propose un panorama d'une recherche intervention menée avec Blanche Segrestin et Benoît Weil dans le cadre du Centre de Gestion Scientifique, laboratoire de Mines ParisTech entre 2009 et 2011, puis à partir de décembre 2011, en tant que chercheur de l'Institut de Recherche en Gestion de l'Université Paris-Est Créteil. Son travail de recherche s'est articulé avec une démarche managériale très opérationnelle initiée au CNES par Claude Fratter dans l'objectif de faire évoluer les méthodologies des études exploratoires.

✹ L'ÉTRANGETÉ DES PROJETS D'EXPLORATION

Sylvain Lenfle professeur au CNAM et chercheur au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.
Dans ce chapitre, Sylvain Lenfle propose une étude monographique d'une de ces pratiques innovantes qui ont trouvé moyen de s'insérer dans des contraintes managériales a priori antagonistes. L'objectif n'était pas de réaliser une analyse exhaustive du secteur des télécommunications spatiales. Seules les caractéristiques importantes pour l'étude des processus d'innovation au sein du CNES ont été retenues. Son analyse suggère que le CNES pourrait utilement distinguer les méthodologies de travail par projet afin de mieux les adapter aux objectifs poursuivis.

✹ À LA RENCONTRE DES USAGES OPÉRATIONNELS. LE LONG CHEMIN DES RADIANCES

Sylvain Lenfle professeur au CNAM et chercheur au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.
Directeur de travaux de master et de thèses consacrés à l'étude de la valorisation des données d'observation de la Terre pour des enjeux environnementaux, Sylvain Lenfle a observé que tous les acteurs considéraient l'usage des données satellite par la météorologie comme le modèle emblématique d'une appropriation opérationnelle des mesures établies par les dispositifs d'observation spatiaux. La lecture d'articles scientifiques introduisant une autre vision, l'a incité à enquêter. Sa recherche met à jour le processus complexe et long qui a engendré le saut qualitatif en prévision numérique du temps dont l'on se félicite aujourd'hui qu'il ait fourni les moyens d'anticiper la trajectoire d'un ouragan comme Sandy. Son enquête a nécessité un retour vers les étapes de la construction de la météorologie spatiale pour la

prévision numérique du temps, les passionnés en retrouveront les détails en annexe, à la fin de ce chapitre. Pour tous ceux qui sont préoccupés par le développement des usages des mesures satellitaires par des acteurs opérationnels, cette recherche de Sylvain Lenfle, éclaire les conditions à prendre en compte dès la conception initiale de la mission pour que celle-ci ne se limite pas à une très belle expérience scientifique sans lendemain.

✷ RENOUVELER LE DOMINANT DESIGN : HISTOIRE DU CHANGEMENT DE MÉTHODE D'ASSIMILATION DES DONNÉES POUR LA PRÉVISION NUMÉRIQUE DU TEMPS

Sylvain Lenfle professeur au CNAM et chercheur au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.
Un système de prévision numérique du temps comporte deux étapes : l'assimilation de données pour déterminer les conditions initiales, et la prévision proprement dite. La qualité de la prévision dépend de la détermination des conditions initiales. Or, en météorologie, les données à assimiler proviennent de sources très variées : ballons sonde, stations sol, avions, bateaux, satellites, etc. Chacune possède des caractéristiques spécifiques. Toute nouvelle donnée doit passer à la moulinette de ces méthodes d'assimilation et démontrer son apport à la prévision. Dans les décennies quatre-vingts/quatre-vingt-dix, les méthodes d'assimilation dominantes, dites d'interpolation optimale, butent sur l'assimilation des données satellite. Cette section relate le travail conduit afin de réussir à valoriser le potentiel informatif des données satellite pour la prévision numérique du temps.

Valorisation des dispositifs spatiaux : de l'estimation préliminaire à la réalisation effective

Sylvain Lenfle et Christophe Midler sont chercheurs au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.

Ce chapitre reprend la synthèse de travaux réalisés en 2011. Les chercheurs mobilisent la notion de mandat et les théories de la conception innovante pour mettre en perspective comment, sous l'impulsion du CNES, la France, puis l'Europe, sont devenues des puissances majeures de l'industrie spatiale. Cette montée en puissance s'est faite dans le cadre d'usages largement définis par les États-Unis après la seconde guerre mondiale, puis s'est affinée grâce aux progrès scientifiques et techniques. Elle a rencontré des limites à la fin des années quatre-vingt-dix quand la multiplication des programmes et les exigences de plus en plus complexes des pouvoirs publics ont conduit le CNES à une crise financière. L'organisme est alors confronté à la question du renouvellement des applications du spatial et de leur extension hors des domaines historiques que sont la défense, la météorologie et les télécommunications. L'exploration des « applications spatiales innovantes » soulève de nouveaux problèmes. L'analyse des forces et des faiblesses des outils mis en place pour sortir de la crise des années quatre-vingt-dix (méthode « atouts-attraits ») montre la difficulté pour un organisme, à mener de front la poursuite de son développement dans ses domaines d'excellence historiques et l'exploration de nouveaux usages pour lesquels les demandes sont confuses ou inexistantes et les compétences encore à construire.

UNE MISSION D'INNOVATION STRUCTURÉE PAR UN MANDAT

Agence de moyens, chargée de définir la politique spatiale française et de la mettre en œuvre, le CNES est, vis-à-vis du gouvernement français dans la situation d'un mandataire[1]. Dans un mandat, le mandant (ici les tutelles) délègue au mandataire l'exécution d'une tâche ; dans l'accomplissement de cette tâche, le mandataire (le CNES) dispose d'une certaine autonomie. La nature de la relation entre le mandant et le mandataire dépend de la possibilité d'élaborer ou non a priori, une description de l'activité du mandataire et de ses effets attendus. On peut caractériser le mandat du CNES en croisant deux critères *(figure 1)*, d'une part, la nature du mandat et d'autre part, le type d'innovation. La nature du mandat désigne la possibilité, pour le mandant, d'élaborer une description de l'activité du mandataire et de ses effets attendus. Le mandat peut donc être clair si le mandataire exprime clairement ses besoins ou complexe s'il ne le peut pas.

En termes de type d'innovation, le CNES est confronté à trois cas de figure selon que la nouveauté porte plutôt sur les concepts étudiés (C), les connaissances nécessaires (K) ou les deux simultanément (Le Masson & al. 2006). Trois situations peuvent être ainsi identifiées :

- Type 1 (ΔC-δK) : l'entreprise explore avant tout de nouvelles valeurs, sans que cela ne suppose la construction de connaissances nouvelles (les hôtels Formule 1, le VTT, le porte-clou, etc.)
- Type 2 (δC-ΔK) : si la nature de la performance bouge peu, les connaissances sont profondément renouvelées par des ruptures techniques (typiquement pour la photographie, le passage de l'argentique au numérique, la loi de Moore dans les semi-conducteurs, l'acoustique dans l'automobile, etc.)
- Type 3 (ΔC-ΔK) : l'innovation combine à la fois recherche scientifique et innovation conceptuelle ; ce sont les plus difficiles à gérer. La plupart des innovations dites traditionnellement radicales, entrent dans cette catégorie (l'éclairage électrique, les nanotechnologies, la réduction des émissions de CO_2, etc.).

1 Jacques Girin 1995

Les types de relations de mandat en conception		Mandat	
		Clair	Complexe (Confus)
Champ d'innovation	$\delta C - \Delta K_1$	Epoque 1 1962 - 1965	
	$\delta C - \Delta K_2$	Epoque 2 1965 - 1980	
	$\delta C - \delta K$	Epoque 3 1980-2000 (?)	
	$\Delta C - \Delta K$		Depuis 2000 (?)

Figure 1 – les types de relations de mandat en conception.

La « revisite » de l'histoire du CNES avec ce modèle débouche sur les enseignements suivants :

- En trente ans, le CNES a impulsé la construction d'une industrie leader du spatial ; ce dont atteste une liste de succès, parmi lesquels le lanceur Ariane, le programme SPOT, les satellites MétéoSat, Topex-Poséidon/Jason.
- En matière d'innovation, le CNES s'est appuyé sur une structuration des usages du spatial héritée des États-Unis (RAND, 1946) : météorologie, observation de la terre (militaire puis civile), télécommunication, recherche. À l'intérieur de ce *dominant design*[2], le CNES a su développer des niches, telles que le programme SPOT, l'altimétrie, l'océanographie ou encore le sondage atmosphérique, qui lui ont permis d'exister face aux budgets sans commune mesure de la NASA. Le CNES a fait preuve d'une capacité d'extension des usages des données existantes.
- Ce développement s'est traduit par une complexification croissante du mandat qui, de l'affirmation au départ d'une indépendance stratégique, a évolué vers « l'espace utile », notion très globale. Les cinq axes du contrat état-CNES de 2011-2015 illustrent cette complexité croissante du mandat.

2 La solution qui, à un moment donné, s'impose comme incontournable dans une industrie.

- La nécessité, depuis 2000, d'un renouvellement de ce dominant design qui se traduit à la fois par une réouverture des concepts et un besoin de renouvellement des connaissances (Type 3, ΔC-ΔK). Nous assistons ainsi à une extension des usages potentiels des données spatiales (transports, santé, environnement, etc.). Celle-ci interroge le mandat du CNES qui, de plus en plus, s'aventure hors des applications historiques du spatial, dans des domaines où les données spatiales doivent faire la preuve de leur valeur ajoutée par rapport à d'autres techniques.

DEUX LOGIQUES D'INNOVATION COEXISTENT AU CNES.

La première (flèche continue de la *figure1*) peut être qualifiée de *sustaining*. Christensen (1997) désigne ainsi les innovations qui consistent à améliorer les performances des produits dans le cadre de critères de performances et d'applications/marchés connus. Les innovations *sustaining* sont légitimes dans l'organisation et, par conséquent, ne rencontrent pas d'obstacles institutionnels important, à la différence des propositions *disruptives*. Jusqu'à la fin des années quatre-vingt-dix, l'innovation au CNES correspond à cette logique car elle se caractérise par des évolutions progressives des concepts et des connaissances (δC-ΔK) dans le cadre de champs d'innovation connus. Cette logique *sustaining* est toujours essentielle pour le CNES qui continue à améliorer les performances de ses systèmes (ex : pléiades) et à répondre aux demandes de ses mandants (scientifiques, militaires, ministères). Sur le plan managérial, elle s'appuie sur la méthode « atouts-attraits » qui consiste classiquement à noter les projets selon différents critères qui permettent d'évaluer à la fois leur attractivité pour le CNES (« les attraits ») et sa capacité à les mener à bien (« les atouts »). Cette méthode insiste notamment sur l'existence d'une demande explicite externe formalisée, notion qui suppose *de facto* l'existence de communautés d'utilisateurs (scientifiques/militaires/industrie/État), capables de formuler des questions et dotées d'une capacité de financement (typiquement la météo).
La seconde logique, que l'on peut qualifier de *disruptive*, vise, au contraire, à explorer de nouveaux espaces de valeurs[3] (flèche pointillée de la *figure 1*).

3 Notons que la distinction *sustaining/disruptive* ne présage pas de la complexité technique des innovations. Une innovation sustaining peut être très complexe techniquement. L'outil IASI, embarqué à bord du satellite MetOp, constitue à cet égard une excellente illustration : il répond explicitement aux besoins de précision accrue en sondage atmosphérique exprimés dès 1981 par la communauté des météorologues.

Dans ces situations d'exploration la valeur est à construire, les communautés d'utilisateurs sont en émergence, l'écosystème également, les technologies sont innovantes, etc. Il devient alors difficile, voire totalement impossible, de calculer un retour sur investissement. Au CNES ceci renvoie aux « *applications spatiales innovantes au service de développement économique, industriel et sociétal* » (appel à projet du CCT applications, 2011). Dans ce cas, il n'existe pas de demande explicite externe formalisée, les projets ne sont pas nécessairement conformes aux priorités de la politique spatiale, les compétences du CNES ne sont pas évidentes, les projets sont difficiles à spécifier et leur(s) impact(s) délicats à évaluer ex-ante.

Précisons que l'existence de différents types de projet (*sustaining* ou disruptive) est inhérente à toutes les organisations (March, 1991). La difficulté est de réussir à concilier ces deux logiques antagonistes avec le risque que l'exploitation (*sustaining*) ne tue l'exploration (*disruptive*), perçue comme trop risquée et non rentable (Christensen, 1997 ; Burgelman, 2003). Le CNES n'échappe pas à ce dilemme. La méthode « atouts – attraits » vise avant tout à sélectionner des projets pour lesquels une demande existe. La difficulté réside donc dans la mise en place d'un processus spécifique pour les missions *disruptives* (ou d'exploration) pour lesquelles la demande explicite externe formalisée n'existe pas, les compétences sont à construire, etc. Tout ceci suppose une rupture managériale importante par rapport aux processus existants.

Sur ce dernier point, notre recherche sur l'exploration des applications spatiales innovantes met en évidence plusieurs points importants :

On assiste au niveau européen, *via* le programme GMES, à l'émergence d'une nouvelle structuration des applications du spatial en matière d'observation de la terre. GMES apporte ainsi deux contributions importantes.

Il définit des espaces de valeurs en termes de services (*land monitoring, marine monitoring, emergency response service, atmosphere monitoring, security, climate monitoring*) ;

Il insiste sur la mise en place d'agrégateurs de contenus mettant à disposition gratuitement des données mises en forme pour faciliter le développement des services « avals ». On assiste ainsi au développement de plateformes (ex : Mercator Océan, leader du projet GMES-MyOcean devenu Copernicus, *Marine Environment Monitoring Service*) qui se situent au cœur d'un écosystème complexe (données satellite, données in-situ, modèles de prévision, utilisateurs, etc.). GMES invite ainsi à repenser le positionnement d'un organisme comme le CNES autour de ce type de plateformes qui peut servir de base pour le développement de futures applications.

DEUX LOGIQUES EN TENSION DANS LES PROCESSUS DU CNES

La première, *celle des appels à idées*, s'inscrit d'une part, dans une volonté du mandant d'élargir les usages du spatial, et d'autre part, de le mettre au service des citoyens[4]. La recherche d'applications innovantes constitue un défi pour le CNES dans la mesure où elle l'éloigne de ses modes de fonctionnement traditionnels. Il s'agit en effet de découvrir les « besoins » d'utilisateurs qui ne sont pas des scientifiques et qui ne connaissent pas les potentialités du spatial. Sur le plan théorique la démarche de l'appel à idée revient à explorer un large éventail de concepts et de connaissance sur la base d'un cadrage a minima. Rosier (2007) qualifie cette approche de multi-forage pour souligner que l'enjeu ici réside dans la diversité des pistes explorées et non dans leur étude approfondie. Dans cette perspective, le spatial est présenté comme une réponse possible et le CNES cherche à identifier les questions les plus pertinentes. Le risque de ce processus est de générer des projets sans suite ou des pilotes éternellement émergents. On peut également douter des critères utilisés pour sélectionner les projets, critères qui restent très influencés par la méthode « atouts-attraits », dont nous avons précédemment souligné les limites pour les situations d'exploration. Il nous semble par ailleurs essentiel de définir plus précisément les thématiques des appels sous peine de voir se créer un processus d'exploration sans boussole. Nul doute qu'il y a là un chantier important pour le CNES.

La seconde logique, *celle de l'exploration ciblée de la valeur* est très peu utilisée au CNES. À l'opposé de l'appel à idée, dont elle est complémentaire, elle supposerait une logique de « carottage » (Rosier, 2007) c'est-à-dire l'étude approfondie d'une application particulière pour en identifier les implications : Quels acteurs ? Quelles infrastructures ? Quel modèle économique ? Quel(s) système(s) technique(s) (satellites, instruments de mesures, segment sol, composantes non-spatiale) ? Etc.

Ainsi, au lieu de partir d'une réponse technique, le processus d'exploration débute par l'identification d'un espace de valeur dont on va explorer le potentiel. La prévention des catastrophes naturelles constitue un exemple type de

4 « *L'idée de la démarche « espace et société » était d'analyser de plus près les demandes, et comment l'espace peut y répondre ; par conséquent, comment faire que nos citoyens tirent bénéfice de l'effort spatial du pays et le soutiennent, autrement que pour des raisons plus ou moins esthétiques et spectaculaires.* » (C. Allègre, 30/11/1999).

ces espaces de valeurs. Notre travail montre ainsi comment le spatial pourrait (le conditionnel est important) constituer un élément déterminant dans la prévention des inondations en mobilisant des outils spatiaux comme, par exemple, le satellite SMOS[5]. Il montre aussi comment cette démarche d'exploration ciblée soulève des questions d'ordres scientifiques (quel apport de quelle(s) donnée(s) aux modèles) et organisationnelles (comment mettre en place un système de prévention/alerte ? avec quels acteurs ? quelle serait le modèle économique ?)

Plus fondamentalement, l'exploration suppose une redéfinition des relations entre mandataire et mandant. En effet, dans une situation où l'innovation combine à la fois recherche scientifique et innovation conceptuelle, le mandant ne peut définir son attente. Il s'agit là d'une difficulté importante pour le CNES qui doit ouvrir son écosystème et, probablement, élargir le cercle de ses commanditaires au sein de la puissance publique comme à d'autres acteurs (par exemple les acteurs de l'assurance pour la prévention des catastrophes). L'identification des questions pertinentes et des acteurs qui les portent, constitue ainsi une difficulté majeure de l'exploration et interroge la relation du CNES à ses tutelles. Il devient alors nécessaire de mettre en place un processus de co-construction de la « demande » et de pilotage chemin faisant, en fonction des résultats de l'exploration.

5 Sur ce point voir le blog du CESBIO : http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?paged=3

Faire enquête

Mathias Béjean est maître de conférences à l'Université Paris-Est Créteil, chercheur à l'Institut de Recherche en Gestion de cette université et responsable d'enseignements à l'École nationale supérieure de création industrielle ENSCI-Les Ateliers.

Dans ce chapitre, Mathias Béjean propose un panorama d'une recherche-intervention menée avec Blanche Segrestin et Benoît Weil dans le cadre du Centre de Gestion Scientifique, laboratoire de Mines ParisTech entre 2009 et 2011, puis à partir de décembre 2011, en tant que chercheur de l'Institut de Recherche en Gestion de l'Université Paris-Est Créteil. Son travail de recherche s'est articulé avec une démarche managériale très opérationnelle initiée par Claude Fratter dans l'objectif de faire évoluer les méthodologies des études exploratoires.

CONTEXTE ET ENJEUX DE LA RECHERCHE

Les capacités d'innovation au CNES

Cette recherche a démarré en 2009 avec l'idée générale d'établir un diagnostic des capacités d'innovation du CNES. Après une première phase d'entretiens exploratoires auprès d'ingénieurs et de scientifiques du CNES, il est apparu que l'agence avait eu une longue tradition d'innovation et qu'elle avait su se positionner assez tôt sur des filières d'excellence. Cependant, si tout le monde semblait s'accorder sur les succès de ces filières (les cas retenus pour l'étude étaient l'altimétrie et le sondage atmosphérique), l'interprétation de leurs ressorts était plus partagée. Au risque de caricaturer, on peut dire qu'un premier type d'explications faisait reposer les succès passés sur l'expertise et la robustesse des projets qui avaient été progressivement construites au CNES, tandis qu'un autre type d'explications mettait en avant un ensemble de pratiques assez riches d'interaction entre les ingénieurs du CNES, les milieux scientifiques et les utilisateurs de la donnée. Selon ses partisans, si ces pratiques pouvaient paraître souvent

informelles et dispersées, elles n'en étaient pas moins déterminantes dans l'émergence des concepts des missions ou encore dans la constitution des nouvelles communautés utilisatrices associées.

Ainsi, par exemple, dans un entretien du 13 novembre 2009 à Toulouse, Anny Cazenave nous exposait son interprétation du développement de l'altimétrie spatiale au sein du CNES, indissociable, selon elle, de l'histoire d'une nouvelle discipline : la géodésie spatiale. Face à des scientifiques peu habitués aux techniques spatiales, elle insistait sur l'importance des investissements à réaliser dans la physique de la mesure, ainsi que sur le rôle structurant qu'avait eu le CNES dans la construction et l'animation d'une communauté scientifique – et d'une discipline – encore en émergence. Rappelant le rôle central de Michel Lefebvre[1] dans cette aventure, elle mettait également l'accent sur le fait que la richesse des interactions entre les scientifiques et les ingénieurs du CNES avait été déterminante pour explorer et étendre les domaines d'application de la donnée spatiale. Dans un entretien du 2 juin 2010 à Toulouse, Alain de Leffe reprenait en substance ces idées, en insistant en outre sur le temps long de construction de la valeur d'une donnée spatiale, « au moins égal à son temps de développement » selon lui. De même, l'interaction entre instrumentation et science lui avait paru centrale dans son expérience, notamment dans l'histoire de GeoSat. C'était grâce à des interactions riches, conduites dans un cadre informel, sans mission cible mais orientées dans un but d'apprentissage et de débats (par exemple sur la richesse de la donnée, les effets d'angles, de saisonnalité, de soleil rasant…), mobilisant souvent des stagiaires pour conduire des études exploratoires rapides et même l'audace de « lancer des choses sans savoir ce que l'on va voir » (par exemple « supercyclope » sur avion), qu'ils étaient parvenus, selon lui, à stimuler l'imagination collective, à faire mûrir les concepts instrumentaux, à constituer une physique de la mesure et à inventer de nouvelles missions.

Dans le cadre de notre recherche, ces pratiques furent associées à un « modèle de conception par extension des usages » à distinguer d'un modèle qualifié de « conception réglée ». Alors que le second mode d'organisation renvoyait plutôt à de la gestion de projet, le premier mode d'organisation demeurait encore une énigme. Cette énigme, bien qu'ayant émergé de l'analyse du passé paraissait d'autant plus cruciale qu'elle structurait également la manière d'interpréter les capacités d'innovation actuelles du CNES, ain-

1 Ingénieur, responsable du département de géodésie spatiale du CNES à partir de 1970 et considéré comme un pionnier de cette discipline.

si que les modes d'action pour les renforcer. Certains membres du CNES étaient partisans d'améliorer les appels à idées, de renforcer les procédures de sélection et d'évaluation des nouvelles missions, par exemple via la méthode d'interclassement « atouts-attraits » ; d'autres indiquaient la nécessité de soutenir les processus de construction de la valeur, en se centrant sur les potentiels d'extension des usages et les communautés ; dans la thématique Terre-Environnement-Climat, par exemple, cela pouvait signifier de ré-internaliser des compétences pointues en physique de la mesure pour soutenir un dialogue riche et fécond avec les communautés scientifiques et utilisatrices. L'organisation des pratiques d'innovation au CNES pouvait-elle se fondre dans un « entonnoir de l'innovation » ou fallait-il inventer de nouveaux dispositifs d'organisation adaptés ?

✷ DE L'« ENTONNOIR » AU « DIAMANT »

Si l'idée de la recherche était de faire un diagnostic des capacités d'innovation du CNES, il s'agissait également de resituer cette problématique au sein des transformations contemporaines plus générales des modes d'organisation de l'innovation. Comme l'illustre la *figure 1*, la vision managériale de l'innovation au vingtième siècle s'est principalement pensée et décrite sur le mode d'un « entonnoir de l'innovation » (cf. l'expression d'« *innovation funnel* » en anglais), et qui n'était en fait rien d'autre que la déclinaison des principes de la gestion de projet appliqués aux activités d'innovation. Le mouvement du *New Product Development* (NPD) a systématisé et popularisé cette vision « projet » de l'innovation dans la plupart des entreprises industrielles et commerciales de la seconde moitié du vingtième siècle. Il en a découlé des modes de gestion portant sur des « étapes » et des « jalons » successifs (cf. le *Stage-Gate* de Cooper), visant à évaluer et sélectionner les meilleures idées à développer ; le raisonnement collectif étant alors orienté vers le contrôle et la résolution d'un problème supposé bien formulé au départ.

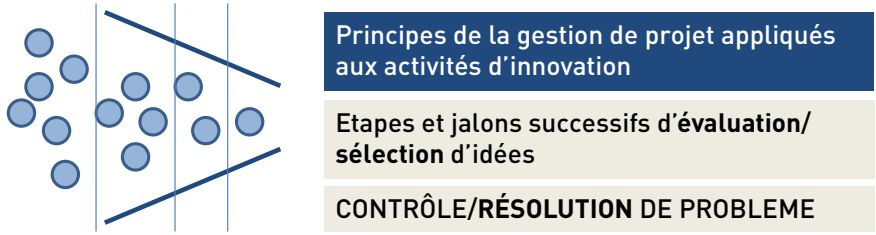
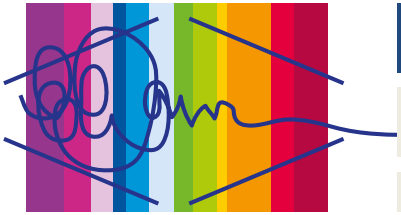


Figure 1 – La vision managériale de l'innovation au XXe siècle : le modèle de l'« entonnoir »

L'on sait, au moins depuis le début des années 2000, les forces et les faiblesses d'un tel modèle d'organisation et de raisonnement de l'innovation. Sa force principale est du côté de la robustesse et du contrôle de ce qui est produit. La gestion des jalons permet ainsi de « tuer » les innovations jugées non pertinentes ou irréalisables assez tôt et d'éviter les dérives du triptyque « Qualité, Coûts, Délais » dans les phases coûteuses de développement. Dans les univers techniques, l'expertise métier et la robustesse des procédures permettent d'assurer à la fois la sélection des bonnes idées et la maîtrise de la résolution de problème, exercice où excellent les ingénieurs des bureaux d'études. Sa faiblesse principale renvoie quant à elle à la réciproque de ce niveau de contrôle élevé, à savoir la limitation assez sensible du potentiel d'innovation et du champ d'exploration couvert ; ce qui a fait dire à certains chercheurs qu'un tel modèle était avant tout pertinent pour l'innovation dite « incrémentale » mais peu adapté à des innovations de rupture ou à la préparation du futur, du moins dans des environnements considérés comme turbulents, incertains ou complexes.

Devant les difficultés évoquées précédemment, d'autres modèles de l'innovation ont vu le jour. Bien que différents à certains égards, ces modèles partagent tous un trait commun : ils ne considèrent plus que le processus d'innovation relève d'une activité de résolution de problème sous contrôle à partir d'une idée bien formulée au départ. Comme le montre la *figure 2*, ces modèles proposent plutôt de considérer que le processus d'innovation intègre des phases de divergence et de convergence sur des concepts en évolution constante – on parle de modèle « Diamant » – et où l'activité est du coup plutôt à considérer comme une « enquête » orientée vers la maturation et la formulation d'un problème pour une « communauté » plus ou moins bien constituée au départ.



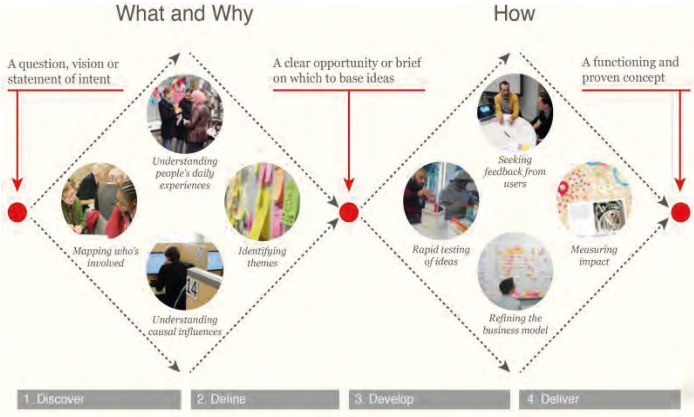
Principes du design industriel et de service appliqués aux activités d'innovation

Cycles successifs de qualification / reconfiguration de « prises »

MATURATION/FORMULATION DE PROBLEME

Figure 2 – La nouvelle vision de l'innovation : le modèle « Diamant »

Notons qu'en réalité cette vision n'est pas entièrement nouvelle, mais s'inspire des méthodologies issues du design industriel et de service, par exemple telles que développées dès les années soixante par le Design Council anglais *(voir figure 3)*, ou des méthodes dites « centrées utilisateur », par exemple telles que développées dans l'ingénierie logicielle et le design des interfaces homme-machine. En revanche, ce qui est nouveau et ne va pas de soi, est de chercher à organiser un processus collectif autour de ces raisonnements d'enquête et de formulation de problème et de l'instituer dans des entreprises établies au-delà des frontières existantes, tant internes (par exemple entre départements) qu'externes (par exemple avec les communautés d'utilisateurs). En outre, le fait de disposer de ce modèle en forme de diamant ou de double diamant, ne fournit pas encore les modes opératoires de l'enquête (cf. l'aspect « tourbillonnaire » de la phase de divergence), ni la façon dont des acteurs hétérogènes (chacun dans leur « tourbillon ») peuvent coopérer pour « faire enquête » ensemble.



http://www.designcouncil.org.uk/

Figure 3 – Exemple du modèle « Double diamant » du Design Council anglais

Les processus d'innovation au CNES : entonnoir ou diamant ?
Partant de ce contexte, la recherche s'est focalisée sur l'analyse des études dites « amont », à savoir les phases 0 du Plateau d'architecture des systèmes orbitaux (PASO). L'analyse de plusieurs cas (Vol en formation, Lentilles de Fresnel, Missions géostationnaires, Diffusiomètre, Lidar) a permis de montrer que deux types d'activités dites « amont » devaient être distingués :

- les **activités de pré-développement** visant à amener une proposition de mission à un stade de définition technico-économique afin de décider le passage ou non en phase A.
- les **activités de pré-positionnement,** visant à amener un concept de mission à un certain niveau de maturité afin d'identifier, dans les domaines des besoins ou de la technique, un programme d'activités à développer, éventuellement en vue de mettre en place des actions de R & T ou une étude de pré-développement.

Il est alors devenu assez clair que :

- en ce qui concerne les activités de pré-développement : le CNES avait investi de longue date dans les méthodes de gestion de projet pour les études de mission. Par exemple, en utilisant des métriques formalisées et partageables (Technical Readyness Level), des processus *ad hoc* (PK, RDM…), des outils (note d'organisation…) et des modes d'organisation (ex. le centre d'ingénierie concourante ou CIC) spécifiques, voire des actions de formation et de partage d'une culture du « projet » en interne.
- en ce qui concerne les activités de pré-positionnement : leur identification formelle n'étant pas clairement partagée, le niveau d'efficacité et de robustesse de leurs pratiques n'est pas équivalent. Beaucoup de pratiques étaient encore insuffisamment formalisées et/ou partagées au moment de cette première étude, alors que les enjeux qui y étaient associés, déjà forts, semblaient voués à devenir encore plus centraux.

Enfin, cette analyse a également permis de fournir une réinterprétation de l'énigme précédente, qui, pour être comprise, nécessite de distinguer les « normes », qui sont des références légitimes et instituées dans la mémoire collective, des « pratiques », qui peuvent être très locales, sans réelle légitimité et parfois même oubliées. Ainsi, dans son histoire, le CNES semble avoir eu des pratiques d'enquête, au sens défini précédemment, qui ont permis d'innover par les usages et la construction de valeur, mais qui ne sont pas parvenues à s'instituer en tant que telles dans l'organisation formelle. En revanche, les pratiques d'exploration du compromis besoin-système se sont progressivement instituées pour former un

schéma normatif des activités dites d'« instruction de mission ». Dans ce schéma normatif, les scientifiques sont censés avoir exprimé un besoin de mesure et le rôle d'une phase 0 se limite alors à une « étude de faisabilité » technique. Il n'est donc pas question ici de « faire enquête » autour d'une question en reformulation continue, mais bien de résoudre un problème donné à partir d'un besoin formulé au départ. Les interactions de la phase d'instruction peuvent ainsi être limitées à quelques points de contact et il n'est pas nécessaire que les porteurs d'étude tracent le besoin à partir des objectifs scientifiques dits « de haut niveau », voire de la valeur d'usage pour la société. Cette situation semble expliquer la raison pour laquelle il n'y a pas toujours constitution d'un réel « groupe mission » dans les études de pré-développement.

Mais ce schéma normatif peut-il toujours valoir dans un contexte de compétition accrue entre proposants, où des missions de plus en plus complexes cherchent souvent à réaliser des « premières mondiales » sur la scène internationale, alors même que les ressources pour réaliser les activités amont sont de plus en plus contraintes (dans les laboratoires, comme dans les agences) et que les critères de sélection sont de plus en plus exigeants et interviennent de plus en plus tôt dans le cycle de vie des nouvelles missions spatiales ? Ce schéma correspond-il d'ailleurs aux pratiques réelles des porteurs d'études qui se confrontent à ce nouveau contexte ? Ne faut-il pas instituer un schéma normatif complémentaire adapté aux études de pré-positionnement ? Un tel schéma alternatif, s'il est possible, ne risque-t-il pas de sonner le glas des pratiques d'enquête qui auraient pu survivre au premier ? Existe-t-il déjà des schémas de ce type et quel en est le retour d'expérience ?

Ces questions ont orienté une seconde phase de recherche.

✺ DE L'INSTRUCTION À L'ENQUÊTE DANS LES PHASES 0 (2011-2014)

Le modèle « diamant » du JPL et les Concept Maturity Levels

Dans ce travail de recherche, deux logiques d'études ont été en articulation dynamique. La première vise à réfléchir l'action et s'exprime dans un effort de formalisation des objets, des processus et des pratiques étudiées, en l'occurrence ici les pratiques d'étude en phases 0. Elle a nécessité la mise en place d'un groupe de travail au PASO à partir de décembre 2011, incluant : Claude Fratter, à l'initiative de cette démarche, Josiane Costeraste, experte responsable de plusieurs phases 0 de pré-positionnement, et l'auteur de ce rapport, chercheur en sciences de gestion à l'IRG de l'UPEC. Elle a

également reposé sur la conduite de retours d'expérience (REX) internes et externes, notamment auprès des scientifiques et utilisateurs de la donnée. Cette première logique s'est toujours articulée à une seconde qui vise, elle, à tester et prototyper des modes d'opérationnalisation des analyses précédentes à un moment donné de la recherche. Ceci a par exemple conduit à concevoir, expérimenter et évaluer des « ateliers d'opérationnalisation ». Dans ce cas, l'articulation des deux logiques de formalisation et d'opérationnalisation, a consisté à évaluer les ateliers et leurs productions en vue de mieux caractériser les difficultés rencontrées par les acteurs du groupe mission dans les phases 0 de pré-positionnement : la clarté du mandat initial, la stratégie de composition du groupe mission, et son éventuelle évolution au cours de l'étude, ainsi que le fonctionnement du « triumvirat » (PASO/DSP/PI) ont ainsi été reconnus comme faisant partie des déterminants clés de la robustesse du travail de maturation, mais encore insuffisamment installés dans les modes de fonctionnement actuels. Surtout, cette évaluation a fait émerger de nouvelles questions, notamment en lien avec le travail d'enquête du groupe mission.

En ce qui concerne le travail de réflexion et de formalisation, il se trouve que le *Jet Propulsion Laboratory* s'est posé des questions comparables, il y a une quinzaine d'années. Au milieu des années 90, la NASA réorganise ses activités pour mettre en place un centre d'ingénierie concourante pour les phases amont et crée la « Team X » au sein du JPL (équivalent CIC au CNES). Ce dernier est constitué de vingt ingénieurs organisés par « *key mission subsystems* » (Power, Telecommunications, Propulsion…). Une étude typique consomme trois cents à quatre cents heures d'ingénieurs et développe un à trois « point design missions ». Cela dit, cette organisation paraît très vite limitée pour les phases les plus en amont des nouvelles missions spatiales. Elle suppose en effet une compréhension aboutie des spécifications techniques et scientifiques, qui n'est pas toujours acquise, et se heurte donc à des difficultés pour travailler avec des « clients » (à savoir ceux demandant l'étude) dont la réflexion n'est souvent pas encore suffisamment mature.

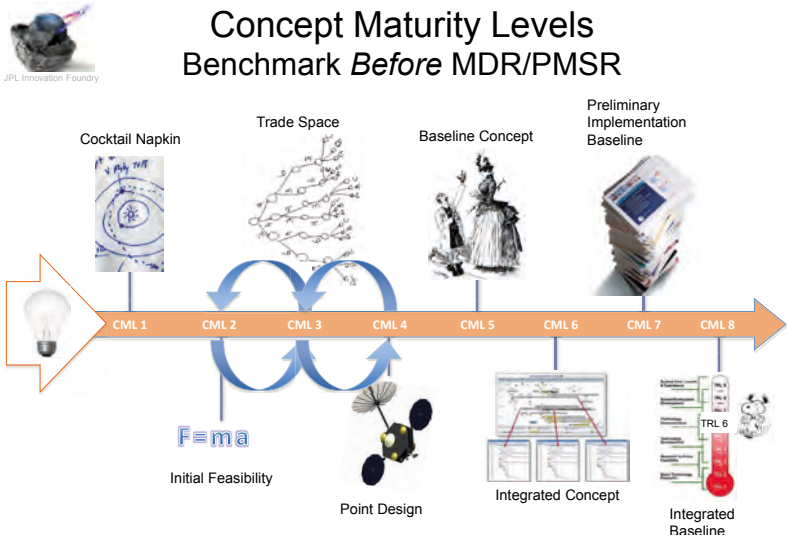


Figure 4 – Les Concept Maturity Levels – Source : Kelley Case, Concept Design Methods Chief, October, 2012

Un groupe de travail rassemblant la vingtaine d'experts de la Team X est alors constitué en vue de travailler sur un nouveau mode d'organisation des activités de formulation de nouveau concept de mission (*early mission formulation*). L'idée est de : (i) partager un langage commun (comme les TRL ont pu permettre de le faire pour les projets), (ii) avoir un outil d'évaluation de la maturité d'un concept pour faire une sélection hiérarchisée de portefeuille de missions à soutenir, (iii) obtenir une capacité d'analyse très amont pour guider les travaux et identifier un plan de travail, (iv) développer des outils et modalités pour mener ces analyses afin de sélectionner des concepts prometteurs, (v) minimiser la durée d'analyse et les ressources nécessaires. Comme le montrent les *figures 4 et 5*, le JPL invente une nouvelle métrique dès les années deux mille et propose un nouveau schéma de gestion des processus de formulation des nouveaux concepts de mission sur la base d'un modèle « diamant » (et non plus d'« entonnoir »). Une nouvelle organisation de ces activités en a également découlé avec la création de la « Eureka Team » pour les CML 1 (composition variable : six à dix personnes, incluant des extérieurs) et de la « Rapid Mission Architecture Team » (RMA) pour les CML < 3 (huit à dix experts système).

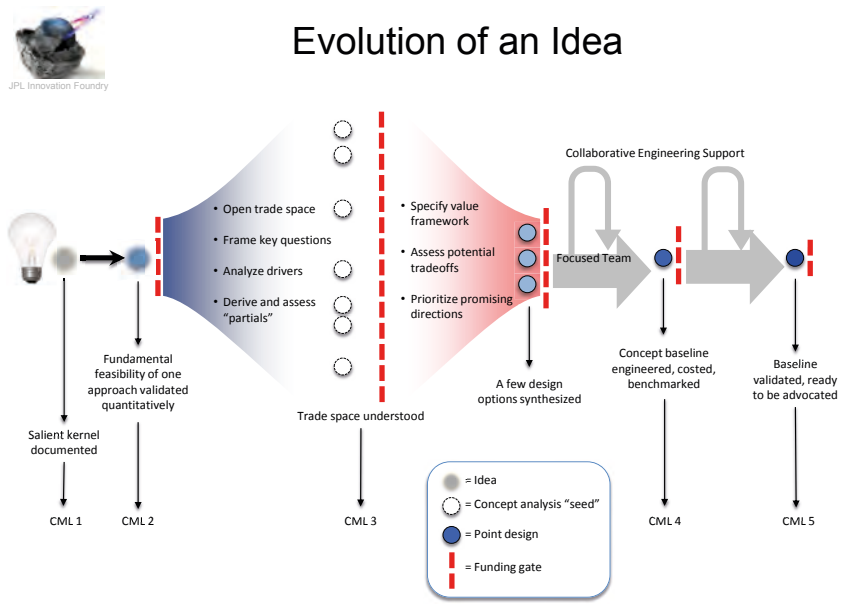


Figure 5 – Le modèle Diamant du JPL – Source : Kelley Case, Concept Design Methods Chief, October, 2012

Organiser des activités de maturation et d'incubation au PASO

Sur la base de l'expérience du JPL et de la NASA, la recherche a visé à élaborer un nouveau schéma de gestion des activités de maturation et de formulation de problème au PASO. L'idée était alors de caractériser des niveaux de maturité et des activités afin de conduire le traitement d'une idée initiale de mission par une exploration des besoins, de la technique (mesure, instrument, système), du projet (organisation, partenariat…), ainsi que de fournir des repères sur la capitalisation de la démarche d'exploration et des concepts novateurs (pour l'étude en question ou pour d'autres idées de mission ou système). La *figure 6* illustre de façon synthétique le résultat du travail de formalisation, détaillé dans le «*Guide des bonnes pratiques de l'exploration en phase 0*» (Fratter, Costeraste, Béjean 2013).

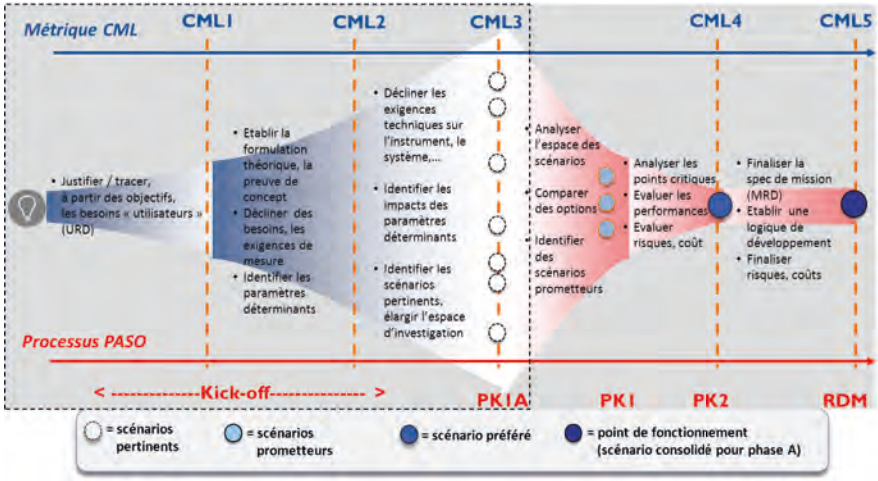


Figure 6 – Processus PASO et niveaux de maturité d'un concept mission – Source : *Guide des bonnes pratiques des activités d'exploration en Phase 0*

Deux ateliers d'opérationnalisation ont été mis en place entre 2013 et 2014.

- **Atelier 1** – « Opérationnalisation des activités d'exploration en phase 0 »
  - Organisé le 19 février 2013 par le PASO
  - Environ quarante participants, dont principalement des experts techniques (TEC, SME, PF, GP)
  - Mais aussi : quatre thématiciens, deux experts « coûts » et trois membres du « groupe innovation »

Cet atelier a conduit à la diffusion du « *Guide des bonnes pratiques de l'exploration en phase 0* », présenté lors d'une demi-journée de restitution au PASO le 3 juillet 2013. Ce guide est un document introduisant le vocabulaire et les notions utilisés pour caractériser les objectifs et activités des différents types d'études amont du CNES. Il introduit les notions de maturité d'un concept de mission et d'activités de maturation. Il est un document d'aide à la conduite de phases 0 destiné aux équipes techniques de la DCT, aux équipes thématiques de la DSP et aux scientifiques ou experts liés à l'expression des besoins.

- **Atelier 2** – « Les pratiques d'études en phase 0 en Observation de la Terre »
  - Organisé le 11 avril 2014 par la DSP et le PASO

– Environ trente – cinq participants, dont seize scientifiques
– Mais aussi : des experts techniques du PASO (TEC) et des thématiciens de la DSP (TEC), ainsi que des membres de la DLA et du « Groupe Innovation » du CNES.

Cet atelier a eu pour objectif de partager les perceptions et les retours d'expérience entre les différents acteurs et participants aux phases 0. L'atelier a abouti à l'identification de points d'amélioration et de discussion sur le pilotage des phases 0 qui ont été présentés dans le document de synthèse du REX externe sur les phases 0 du CNES (Béjean, Novembre 2014). Le point le plus important pour notre travail actuel est le fait que les scientifiques interrogés semblaient également à la recherche d'interactions plus riches avec les porteurs PASO et les thématiciens de la DSP. Par exemple :

- **Les scientifiques utilisateurs de la donnée :** intervenant à partir du niveau 2, ils mettent en avant le caractère stimulant et instructif des phases 0 pour leur travail scientifique. Les interactions avec le PASO leur permettent de mieux appréhender les tenants et aboutissants de la mesure, en lien aux besoins scientifiques de haut niveau, surtout lorsque les phénomènes observés sont de plus en plus ténus. Réciproquement, ils leur semblent que ces interactions sont déterminantes pour la robustesse de la maturation technique.
- **Les scientifiques impliqués dans le concept instrumental ou les traitements de premier niveau :** ces acteurs ont davantage d'attentes en termes d'échanges approfondis sur la technique avec le PASO. Ces interactions leur paraissent manquer dans les phases 0 de pré-positionnement, surtout du fait des délais et des modes d'organisation du groupe mission. Certains précisent que d'autres agences (ex. JPL/NASA) organisent des interactions bien plus riches entre ingénieurs et scientifiques et que les activités de maturation ne se limitent alors pas à des études de « faisabilité », censées arriver bien plus en aval de cette exploration préliminaire.

Ces ateliers sont ainsi venus confirmer l'intérêt de concevoir un nouveau cadre d'action collective dans la préparation du futur au PASO. Ce cadre doit permettre de soutenir l'émergence et l'évolution d'un collectif d'enquêteurs aux expertises hétérogènes autour d'un problème plus ou moins bien formulé au départ, et dont la formulation est de toute façon elle-même sujette à des transformations ; c'est du moins, l'un des résultats principaux de la première phase de recherche sur les pratiques d'étude en phases 0 décrite précédem-

ment[2]. Autrement dit, ce cadre doit soutenir la dynamique de constitution réciproque entre un collectif et une question, étant précisé que ni les frontières du collectif concerné par la question posée initialement, ni les frontières du problème devant être traité, ne peuvent être considérées comme données à l'avance et stables dans le temps.

INSTRUMENTER L'ENQUÊTE COLLECTIVE (2015-16)

Enjeux, outils, compétences

Le premier aller-retour entre formalisation et opérationnalisation que nous venons de décrire a posé le contexte d'une nouvelle recherche sur les modes d'instrumentation de l'enquête collective. L'année 2015 a ainsi été consacrée au démarrage d'une étude sur les méthodologies d'enquête au sein des phases 0 de pré-positionnement, qui s'est poursuivie en 2016. En effet, au-delà des difficultés de formalisation, les difficultés d'opérationnalisation sont à prendre en compte immédiatement, en ce que les ressources (temporelles, humaines, économiques) sont, elles, bien limitées par le cadre des phases 0 : l'enquête ne peut être poursuivie indéfiniment et le groupe mission ne peut être étendu sans limite. C'est la raison pour laquelle la question des méthodologies se pose de façon à la fois cruciale et contradictoire. Cruciale, car ces méthodologies deviennent nécessaires pour explorer de nouveaux concepts de mission tout en tenant compte de l'économie générale de l'enquête collective ; et contradictoire, puisqu'elles visent à cadrer et limiter ce qu'elles prétendent précisément ouvrir et favoriser[3]. D'où la nécessité de construire également une sorte de « discours de la méthode » qui n'en fasse pas des recettes à suivre aveuglément, mais simplement des manières d'instituer des modes de faire enquête suffisamment légitimes et adaptés aux situations nouvelles des phases 0.

Dans un premier temps, une nouvelle phase d'opérationnalisation a conduit à concevoir et évaluer une formation de sensibilisation aux pratiques d'étude en phase 0 à destination des porteurs techniques. Cette formation s'est déroulée le 24 mars 2015. Elle a rassemblé environ quinze personnes (en majorité des

---

2 Voir aussi : *L'organisation des activités de maturation- Synthèse du REX EXTERNE sur les Phases 0 du CNES*, Mathias Béjean, Novembre 2014

3 Sur cette tension entre le *nécessaire* et l'*impossible* voir : Laufer (2003), « Les 'figures de l'espoir'», in *Le Libéralisme, l'Innovation et la Question des Limites* (coord. Laufer et Hatchuel), L'Harmattan, Paris.

responsables d'étude, mais incluant également des thématiciens), dont une dizaine de porteurs externes, toutes thématiques confondues (TEC, SME, GP, Infra). La journée visait à faire un focus sur les études de pré-positionnement et à sensibiliser les porteurs à la notion de maturité, à sa métrique associée (les CMLs), ainsi qu'aux implications méthodologiques que cela suppose, du moins telles qu'elles avaient alors été formalisées dans le guide des bonnes pratiques. L'ensemble de la journée à été enregistré puis analysé. Certains moments de la journée, en particulier la présentation des études menées par les porteurs externes, ont été retranscrits en vue d'une analyse de contenu. Un questionnaire a également été administré à la fin de la journée : quinze réponses ont été analysées dans le cadre du groupe de travail PASO. L'ensemble s'est déroulé entre janvier et août 2015.

Résultats et perspectives

D'une façon générale, les porteurs sont en demande d'accompagnement méthodologique dans leur pratique d'étude et ont très bien réagi à la formation. Les échanges ont révélé que la majorité des porteurs externes connaissent mal le fonctionnement interne du PASO et les « outils de base » qui peuvent les aider dans leur travail d'étude (note d'organisation, URD, MRD…). La distinction entre pré-développement et pré-positionnement semble encore floue pour eux et, mis à part les études dans la thématique GP, la plupart n'expriment pas un « niveau de maturité » de leur étude, ni ne mentionnent, dans la présentation qui leur avait été demandée en début de journée (sept à huit minutes par étude), la *valeur* du concept de mission. Beaucoup insistent sur les gains en performance instrumentale (résolution, radiométrie…), mais n'établissent pas suffisamment les liens entre les besoins de haut niveau et la spécification du compromis besoin-mission en vue d'exprimer une création de valeur en termes d'usage.

Plus spécifiquement, l'analyse de cette formation pilote a révélé que le « point de vue porteur » était insuffisamment pris en compte dans la démarche d'étude telle que formalisée dans le guide des bonnes pratiques. Cette analyse a conduit le groupe de travail PASO à produire une typologie des méthodologies d'enquête en fonction de cibles et de postures différentes dans les processus concernés :

- **Type 1 :** les méthodologies d'exploration du compromis « besoin-système », ciblant les porteurs techniques et visant à les aider dans leur travail en propre d'exploration tout au long des différents « cycles » des études de pré-positionnement. Un focus particulier est nécessaire sur la construction et l'utilisation des critères d'exploration de ce compromis.

- **Type 2 :** les méthodologies de facilitation des activités de formulation et de maturation de nouveaux concepts de mission, ciblant les coordonnateurs d'un groupe mission et visant à les aider dans la gestion des interactions entre les différents acteurs : scientifiques éloignés du spatial ou de l'instrument, scientifiques instrumentistes connaissant bien le spatial ou la physique de la mesure, autres utilisateurs de la donnée, industriels, thématiciens… Ces méthodologies incluent les outils d'expression du besoin et de sa traçabilité.
- **Type 3 :** les méthodologies d'aide à la décision ciblant plutôt les directions ou des acteurs qui ne prennent pas directement part à une étude donnée, mais qui sont en situation de pilotage stratégique et visent à leur fournir des méthodes et outils (critères, métriques…) robustes et adaptés pour l'évaluation de portefeuilles d'études (besoin, technique, programmatique) et la prise de décision stratégique.

Enfin, la prise de conscience qu'un effort de partage et de formalisation des bonnes pratiques était nécessaire sur les méthodologies de types 1 et 2 a conduit au lancement d'un REX auprès de porteurs techniques du PASO. L'analyse des résultats devrait permettre de mieux comprendre les nouveaux modes de travail en jeu et de mieux équiper les protagonistes de l'enquête collective.

Cette seconde phase d'« enquête sur l'enquête », illlustre les transformations des modes d'organisation et de raisonnement collectif dans les études de pré-positionnement explorées au PASO. La première phase de la recherche avait montré les facteurs motivant ces transformations ; s'appuyant sur d'autres approches et d'autres expériences, la seconde a identifié, élaboré et testé un nouveau modèle d'organisation de ces activités. À l'opposé d'un modèle en « entonnoir » hérité de la gestion de projet, ce modèle en « diamant » pourrait instituer des chemins et des temporalités mieux adaptés aux enjeux contemporains de l'exploration de la valeur des missions spatiales. S'agissant du CNES, on peut d'ailleurs le rattacher à une histoire plus longue de pratiques informelles à rendre visibles et à partager. L'analyse et le prototypage de ce modèle révèlent les efforts de compréhension nécessaires à une pleine opérationnalisation. Ainsi, si le recours à l'imaginaire du « tourbillon dans le diamant » *(cf. figure 2)* permet de sortir d'une vision trop linéaire et mécaniste de l'activité d'exploration, une meilleure compréhension des opérations et structures à l'œuvre dans ce « tourbillon » est indispensable pour le rendre réellement opératoire. Tel est le sens du travail sur les méthodologies de l'enquête collective.

Principaux sigles utilisés

DCT	Direction du centre de Toulouse
DSP	Direction de la Stratégie et des programmes (intégrée à la DIA depuis janvier 2016)
PASO	Plateau d'architecture des systèmes orbitaux
PI	Prospective Innovation
TEC	Terre Environnement Climat (domaine thématique)
SME	Sciences Micropesanteur Exploration
GP	Grand Public
PF	Plateforme
Infra	Infrastructure
PK	Point clé
CML	Concept Maturity Level
CIC	Centre d'ingénierie concourante
RDM	Revue de mission

L'étrangeté des projets d'exploration

**Sylvain Lenfle, professeur au CNAM
et chercheur au laboratoire I3, Centre de Recherche
en Gestion de l'École Polytechnique.**

Dans ce chapitre, Sylvain Lenfle propose une étude monographique d'une de ces pratiques innovantes qui ont trouvé moyen de s'insérer dans des contraintes managériales a priori antagonistes. L'objectif n'était pas de réaliser une analyse exhaustive du secteur des télécommunications spatiales. Seules les caractéristiques importantes pour l'étude des processus d'innovation au sein du CNES ont été retenues. Son analyse suggère que le CNES pourrait utilement distinguer les méthodologies de travail par projet afin de mieux les adapter aux objectifs poursuivis.

LE CNES FACE À L'ÉMERGENCE DES « PROJETS ÉTRANGES »

Les télécommunications ou le premier marché de l'industrie spatiale
La première raison qui nous a conduit à nous intéresser aux télécommunications spatiales[1] est l'importance fondamentale de ce secteur pour l'industrie spatiale en général. Comme le montre une étude Euroconsult de 2011 *(figure 1)*, les télécommunications représentent, et de loin, le premier marché pour les lanceurs, les satellites et les services à valeur ajoutée.

1 Nous regroupons sous ce terme les activités de téléphonie, (fixe ou mobile), d'accès internet et de télédiffusion que les usages soient civils ou militaires. À titre d'exemple les activités de télédiffusion représentent 68,7 % du CA d'Eutelsat.

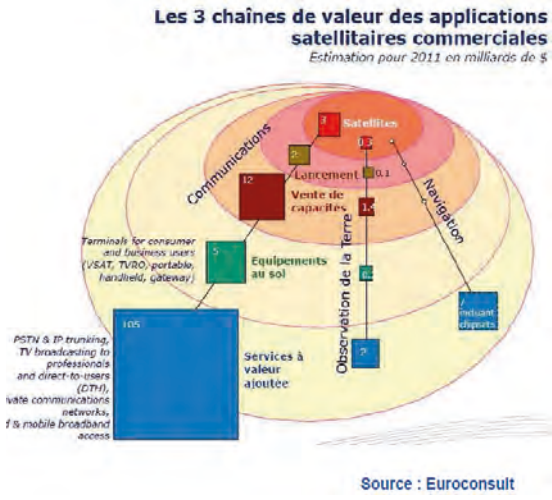


Figure 1 – Le poids économique des télécommunications spatiales.

De surcroît, les télécommunications spatiales constituent un secteur stratégique à la fois en termes économique (compte tenu du poids d'entreprises comme Thalès et Astrium) et militaire (les télécommunications jouant un rôle essentiel pour le fonctionnement des forces armées et donc l'indépendance militaire de notre pays).

L'industrie des télécommunications a été profondément bouleversée par le mouvement de déréglementation de la fin des années 90 et les privatisations qui en ont découlé. C'est aujourd'hui le seul secteur du spatial dans lequel les acteurs privés jouent le rôle principal tant pour les lanceurs (Arianespace, Proton…), les satellites (Astrium, TAS, Boeing, Loral…) ou les opérateurs (Eutelsat, SES, etc. pour les satellites ; Orange, SFR, etc. pour les services aux usagers). Cette déréglementation s'est traduite pour le CNES par la perte de ses interlocuteurs institutionnels civils privilégiés. De plus, le secteur des télécommunications s'est trouvé privé du moteur en matière de R & D qu'était le CNET. Dans ce contexte, le CNES a envisagé de combler ce vide pour les télécommunications spatiales ; il s'est interrogé sur ses compétences et sur sa légitimité dans une industrie dominée par des acteurs privés.

Les télécommunications spatiales constituent un secteur très concurrentiel. Les capacités de production sont largement supérieures à un marché d'environ 20 à 30 satellites géostationnaires par an. Cette surcapacité se

traduit par une pression à la baisse des prix, pression accentuée par la concurrence féroce que se livrent les deux principaux acteurs que sont l'Europe et les États-Unis. Dans ce duopole, ces derniers sont avantagés par la parité euro/dollar d'une part, et par le poids du *Department of Defense* et de la NASA qui, de facto, subventionnent largement les entreprises du secteur (Boeing, Loral, Space X…). La domination américaine est telle que l'enjeu, pour les autres acteurs est d'une part de savoir qui va finir second et, d'autre part, de ne pas rater une innovation technique, au risque de décrocher et de perdre irrémédiablement pied sur les différents segments de marché (voir le mouvement actuel vers les satellites à propulsion électrique initié par Boeing et son satellite 702 lançable par une fusée Space X). Ceci pèse sur les capacités de R & D des acteurs européens et interroge le rôle du CNES. Précisons enfin que cette concurrence est accentuée par l'indifférence de l'usager final à la technique utilisée. Le spatial ne représente qu'une part infime du marché des télécommunications et il se retrouve frontalement en concurrence avec les autres solutions techniques, très majoritairement basées sur des réseaux terrestres.

Dans ce contexte, l'innovation constitue un des moyens d'assurer un positionnement pérenne de l'industrie européenne sur le marché. Dans ce domaine des télécommunications, l'innovation porte à la fois sur les technologies et sur les usages. Et pour la partie strictement spatiale, elle vise une amélioration des performances dans le cadre de critères de performances connus (innovation sustaining[2]).
Sur la longue période, on observe ainsi :

- Une stabilisation de la structure des satellites autour d'un dominant design.
  Une amélioration spectaculaire de la puissance des satellites (multiplication du nombre de répéteurs et de la puissance électrique) et, corollaire, de leur masse *(figure 2)*. Ceci a permis de satisfaire de nouveaux besoins (typiquement la télédiffusion mais aussi, à terme, l'internet mobile). Techniquement parlant cette évolution se traduit par une montée en fréquence des bandes C & Ku vers la bande Ka. Toutefois compte tenu, d'une part des difficultés techniques associées à cette évolution (précision dans l'usinage des antennes et dans les dispositifs de pointage vers une zone, gestion des faisceaux, perturbation de l'atmosphère…) et, d'autre part des incertitudes sur les usages associés à ces nouvelles fréquences (ex : l'internet pour

2 Clayton Christensen (1997) Cf. page 7.

la bande Ka), ce processus est très long (une décennie pour l'apparition des premiers satellites en bande Ka[3]). En effet, étant donné le coût d'un satellite de télécommunication (environ 300 M€ lancement compris), les opérateurs sont réticents à lancer des satellites dont les usages ne sont pas garantis.

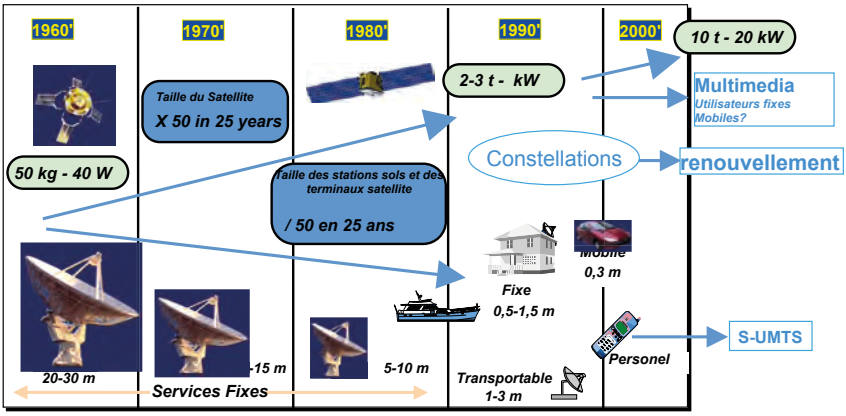


Figure 2 – L'innovation dans les télécommunications spatiales 1970 – 2010
Source : Jacques Sombrin – Cours ENSEEIHT/3EN MO : Instruments et charges utiles micro-ondes – sept.2013

Une des difficultés du processus d'innovation dans les télécommunications spatiales est liée à l'extrême complexité de cet écosystème. Il est ainsi utile de distinguer trois niveaux différents :

- Le *segment spatial* qui comprend le satellite et le centre de contrôle.
- Le *segment sol* qui comprend les réseaux télécoms fixes et/ou mobiles[4]

3 KA-Sat, premier satellite d'EutelSat dédié à l'internet en bande Ka, a été conçu par Astrium et lancé en décembre 2010. Il supporte notamment le service Tooway par lequel des particuliers accèdent à l'internet haut débit dans des zones isolées, moyennant l'installation d'une antenne parabolique, d'un modem et la souscription d'un abonnement dont le montant varie en fonction du débit et de la quantité de données/mois.

4 Nous utilisons le terme générique de réseaux télécoms pour ne pas complexifier à l'excès. Il est toutefois utile de préciser que les standards OSI qui gouvernent le fonctionnement des réseaux télécoms comportent sept couches différentes, chaque couche pouvant être gérée par une entreprise différente.

mais aussi les terminaux utilisateurs et les fournisseurs de contenus. Il existe à ce niveau une très grande hétérogénéité dans la stratégie des opérateurs de télécommunications. Certains, comme Orange, possèdent une infrastructure fixe et mobile et sont également fournisseur de contenus. D'autres ne possèdent qu'une partie de l'infrastructure (mobile dans le cas de Bouygues Télécoms) voire pas du tout (Free). Enfin les opérateurs satellitaires comme Eutelsat fournissent leurs services aux opérateurs de télécommunications, mais aussi directement aux particuliers (ex de l'internet haut-débit par satellite développé par Eutelsat).

- Et enfin, le niveau des *instances de régulation* telles que l'Union Internationale des Télécoms, agence de l'ONU, en charge de la réglementation et de la planification des télécommunications dans le monde, qui gèrent la ressource rare, à savoir l'attribution des fréquences (type de fréquence + type d'usage dans conditions données).

Toute innovation portée par le spatial doit s'assurer de sa compatibilité avec les différents éléments de l'écosystème. Les points bloquants peuvent apparaître «*à des endroits bizarres*», très éloignés du segment spatial (cœur des préoccupations du CNES), typiquement au niveau de l'exploitant ou dans les terminaux utilisateurs qui, s'ils ne sont pas compatibles, rendent caduques les efforts réalisés.

Or, il faut penser ces compatibilités alors qu'il existe un décalage entre les temporalités des technologies spatiales et celles du marché des télécommunications. Pour un satellite de télécommunications, le temps de développement est d'environ trois ans, la validation des nouvelles technologies requiert environ dix années de R & T et la durée de vie en vol est de quinze ans. Le défi pour la conception consiste à anticiper pendant trois ans les nombreuses innovations qui apparaîtront pendant les vingt-cinq ans suivants. On comprend dans ce contexte, l'importance croissante de la flexibilité des charges utiles.

Le processus d'innovation dans les télécoms est structuré par trois dimensions qu'il faut réussir à coordonner : les usages, l'infrastructure et l'existence ou non d'un opérateur. Le chemin traditionnel consistait à construire l'infrastructure spatiale puis à faire émerger un opérateur spatial qui, à son tour, prenait en charge l'expansion des usages ; d'autres scénarios sont maintenant possibles (et fréquents). Un opérateur existant peut imaginer des usages sans connaître les potentialités du spatial. Comment, dès lors, le convaincre d'adopter cette solution ? Comment dans ce contexte, organiser et penser une complémentarité entre les systèmes spatiaux et terrestres ?

Il est difficile de déterminer si le cas des télécommunications spatiales constitue une exception ou un paradigme. Il est cependant intéressant à étudier en

tant qu'emblème d'une situation dans laquelle l'agence doit composer avec des acteurs privés puissants sur un marché très évolutif.

Le rôle du CNES : le « soutien à la compétitivité »

Historiquement, dans le domaine des télécommunications spatiales, le rôle du CNES a consisté à concevoir soit *des satellites têtes de lignées* (ECS/OTS, Telecom 1, TDF 1 & 2) et ceci s'est arrêté avec la montée en puissance des acteurs privés ; soit, des démonstrateurs techniques (Symphonie) ; et cette dernière logique s'est également arrêtée après le développement du satellite STENTOR[5].

Le CNES a dû repenser son rôle dans un processus d'innovation gouverné par des acteurs privés et dans lequel l'interlocuteur historique, France-Telecom, opérateur parmi d'autres, ne possède pas de satellite en propre, ne réalise plus de recherche et ne formule pas de demande explicite formalisée[6]. Dans ce nouveau contexte, le CNES a développé le soutien à la compétitivité, via des programmes cofinancés avec l'industrie et/ou l'ESA[7]. Les objectifs étaient d'assurer la viabilité de l'industrie spatiale française et européenne[8], de protéger les emplois associés, et de garantir l'indépendance stratégique[9].

---

5 Pour Satellite de Télécommunications pour Expérimenter les Nouvelles Technologies en Orbite. Ce projet très ambitieux, lancé en 1995, cumulait les innovations tant sur la charge utile (antenne active, bande Ku…) que sur la plate-forme (propulsion plasmique, batteries lithium-ion…). Si les études et validations effectuées au sol ont permis à de nombreuses techniques d'être ensuite réutilisées, l'explosion au décollage lors de l'échec du lancement d'Ariane 5 en décembre 2002 n'a pas permis de valider le fonctionnement en orbite. Le coût du développement d'un démonstrateur (385 M€ pour STENTOR) a conduit à l'abandon de cette logique.

6 Cf. chapitre Valorisation des dispositifs spatiaux : de l'estimation préliminaire à la réalisation effective.

7 Via le programme ARTES : http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=511

8 (TAS et Astrium)

9 Ce texte ne traite pas des satellites de télécommunications militaires (Syracuse 1 à 3).

LES PROJETS ÉTRANGES

Pour comprendre les problèmes soulevés par cette situation, il est nécessaire de revenir au modèle de gestion des projets au CNES. Comme dans toute l'industrie spatiale, la gestion par projet occupe une place centrale dans le fonctionnement du CNES. Cette méthodologie répond au souci de réaliser des objets (satellite ou instrument) d'une très grande technicité, non réparables après le lancement, au coût élevé et ce, avec une grande maîtrise des coûts, des délais et de la fiabilité.

Dans la méthodologie en vigueur au CNES, les projets sont structurés en plusieurs étapes selon une logique dite « stage-gate » ; chaque étape doit être validée pour progresser à l'étape suivante, d'où le nom. L'objectif est de vérifier à chaque étape, la qualité du travail réalisé et la fiabilité de l'objet jusqu'à son lancement[10] *(figure 3)*. Chaque étape permet de progresser vers une plus grande maturité (mesurée par un technical readiness level [*TRL*]) jusqu'à l'objet final.

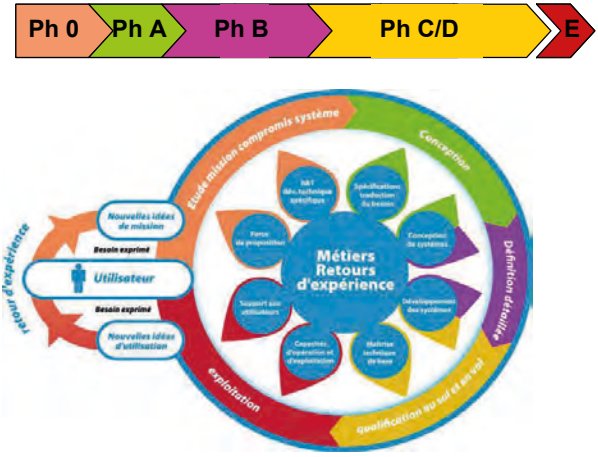


Figure 3 – Le processus projet au CNES

10 Cette logique est directement héritée du programme Apollo au sein duquel elle apparaît en 1963 (voir par exemple Seamans, 2005).

Les forces et les faiblesses du processus « stage-gate » sont maintenant bien documentées dans la littérature[11]. La grande force de ce type de processus est d'étendre aux activités de conception une logique de contrôle des processus et des résultats issue de l'univers de la production. Et cela assure très efficacement la convergence des activités vers la réalisation d'un objet dont les spécifications sont précises dès le début. Et dans cette perspective, il n'existe probablement pas d'alternative managériale à ce modèle. À l'inverse, ce type de logique pose des problèmes pour les projets plus innovants. Le risque principal tient à l'inflexibilité induite par ce processus de convergence contraire à la logique des processus d'innovation (Sehti & Iqbal, 2008). En effet, une fois que le projet a été validé, l'introduction des modifications est difficile voire impossible, ce qui, en situation d'innovation, conduit le plus souvent à l'échec du projet.

C'est en référence à ce modèle dominant qu'il faut comprendre la notion de « projet étrange » proposée par Michel Faup. Cette notion est apparue au cours d'un atelier d'une journée, sur le management de l'innovation au CNES en février 2013. Pour exprimer son malaise vis-à-vis des processus projet du CNES, Michel Faup eut recours au tableau de Jérôme Bosch, *Le jardin des délices (figure 4)*. Le caractère étrange des éléments du tableau constituait une métaphore du décalage entre l'approche « *stage-gate* » du CNES et les projets qu'il gérait qui ne ressemblaient en rien au modèle standard : objectifs flous, travail sur des concepts et non des objets, jalons difficiles à définir et en constante évolution, etc. Compte tenu de ce qui a été dit précédemment ceci n'est pas une surprise. Privés de leurs commanditaires traditionnels et sans objet depuis la fin des démonstrateurs, les équipes télécommunications grand public (TGP dans la suite) avaient dû inventer de nouvelles formes de projets ne se terminant pas nécessairement par un objet. Il leur avait fallu adapter les processus du CNES à la situation. C'est cette histoire qui occupe la suite de cette section, elle révèle un mode de gestion des projets qui pourrait, dans certains cas, venir enrichir les processus de gestion de l'innovation du CNES.

11 Cf. Lenfle & Midler, Note sur l'évolution des méthodes de management de l'innovation pour l'atelier indicateur, CNES, Mars 2013

Figure 4 – Jérôme Bosch, Le Jardin des délices (extrait), (vers 1503-1504, Musée du Prado)

✷ DE LA CONCEPTION DE SATELLITE À L'EXPLORATION DES CONCEPTS : LA NOTION DE DOMAINE D'INNOVATION

L'hypothèse que nous défendons dans cette recherche est que l'entité DCT/PO/TN, en charge des projets de télécommunications et de navigation au centre de Toulouse constitue un cas intéressant, et original au sein du CNES, de pilotage, avec la Direction de la Stratégie et des Programmes, et les métiers radio-fréquence, d'un domaine d'innovation autour de la thématique des « télécommunications spatiales grand public ». En effet, une des évolutions les plus importantes en ce qui concerne l'organisation des processus d'innovation, nous semble être l'apparition de nouveaux acteurs, les responsables des « domaines d'innovation ». Cette organisation, étudiée par exemple chez Valéo (Ben Mahmoud-Jouini & al, 2007), se traduit par la mise en place d'une équipe en charge de l'exploration d'un domaine d'innovation, celui-ci étant défini par un concept a priori porteur de valeur (par exemple, dans le cas Valéo, *powertrain efficiency* ou *driving assistance*). L'équipe, dotée d'un budget et soutenue par le top management, remplit une triple mission d'exploration de ce domaine selon les trajectoires techniques possibles, les usages et les prestations en émergence, les caractéristiques des écosystèmes et des modèles économiques.

Pour ce faire, elle réalise des démonstrateurs qui servent à montrer les possibilités offertes par des nouvelles techniques et à communiquer vers des utilisateurs potentiels comme vers les différents acteurs concernés à l'intérieur de l'entreprise. L'enjeu est d'aboutir à une cartographie des concepts intéressants, des connaissances à développer, des partenaires potentiels, etc. La mission du responsable de domaine s'arrête généralement au stade du démonstrateur ; la difficulté est ensuite de trouver des relais dans l'organisation pour développer les concepts explorés. Les « domaines d'innovation » structurent un nouvel espace, complémentaire à la recherche et au développement.

Pour le CNES, le défi est double puisqu'il s'agit à la fois d'identifier les concepts innovants permettant de structurer cet espace et de mettre en place une organisation capable de prendre en charge l'exploration de ces domaines. Les télécommunications spatiales grand public pour lesquelles ni les technologies, ni les usages ne peuvent être clairement définis, relèveraient de ce type de management par domaine d'innovation. La difficulté consiste en effet à explorer, dans ses différentes dimensions, un espace de conception qui, dans le cas des télécom, évolue très rapidement. L'enchaînement des différents projets *(voir tableau 1 et figure 5)* facilite une dynamique d'exploration des fonctions et des compétences très riche ; exploration qui se déploie simultanément sur les charges utiles, les plateformes et l'écosystème télécom dans son ensemble. Progressivement, l'espace de conception, et ses enjeux (ex : la flexibilité) sont cartographiés ; les compétences associées sont construites. Alors même que son rôle était limité il y a quinze ans, le CNES est devenu un acteur reconnu dans le domaine des télécommunications spatiales. Ceci a été rendu possible par la convergence, rare, de quatre facteurs :

- La cohérence thématique (Télécommunications spatiales grand public)
- Une responsabilité opérationnelle pérenne sur la période
- La stabilité des équipes (petite)
- Une visibilité sur l'ensemble du budget de la thématique permettant, dans une certaine mesure, de réallouer les ressources en fonction de l'évolution des projets et de l'environnement.

Dans notre étude, la gestion du portefeuille de projet – c'est-à-dire la capacité à faire évoluer rapidement les projets en fonction de l'évolution des techniques, des usages et de l'environnement – s'est avérée très dynamique. La *figure 4* montre la richesse de l'exploration qui a été menée. On distingue trois lignées[12] :

- Une lignée de projets orientés vers l'acquisition de compétences et l'étude de questions génériques qui ont permis au CNES de devenir un

12 Voir dans la documentation du CNES la description de ces différents projets.

acteur crédible auprès des industriels ATF/BV/FLIP/FAST/GEICO ;

- Une lignée centrée sur l'étude du potentiel du spatial pour l'accès internet fixe : AGORA/ATHENA/MM2G/THD-SAT
- Une autre enfin centrée sur l'accès mobile : SDMB/A-TVS/SWIMAX/SMILE

Nom du projet	Objectifs	Principaux résultats
ATF (1999 – 2004)	1. Développer les compétences du CNES comme architecte système 2. Explorer de nouvelles compétences potentiellement utiles pour l'industrie	Conception du Banc Système Telecom (BST) pour simuler et tester le comportement et la performance de la chaîne d'émission/réception qui constitue le cœur de la charge utile d'un satellite.
BV (2002 – 2007)	Suite d'ATF : conception d'un banc de validation pour valider les nouvelles charges utiles au sol (y compris les interactions avec le segment sol)	Le banc de validation est utilisé par les partenaires pour tester les EQM, développer des compétences et des solutions que l'on retrouvera sur les satellites militaires Syracuse.
AGORA (2002 – 2004)	Développer un satellite pour l'accès internet haut-débit dans les zones non couvertes par les réseaux terrestres.	Études de faisabilité et phase A terminée avec des partenaires industriels mais arrêtées en 2004. Phase B jamais lancée en raison de la réticence des opérateurs télécom à financer le projet. Lancement d'une nouvelle étude pour les applications civiles (THD-Sat) en 2010. Lancement prévu en 2018.
Athena-Fidus (2005 – 2014)	Développer un satellite pour l'accès internet haut-débit dans les zones non couvertes par les réseaux terrestres pour les forces armées (France et Italie).	Suite d'AGORA ; satellite développé par Thales and Telespazio and lance en février 2014
FLIP (2006 – 2014)	FLexible Innovative Payload : étude de l'impact de la flexibilité sur la conception des satellites	Nouveaux produits pour la charge utile, prototypes, nouveaux modèles d'ingénierie, compétences (voir ci-dessous).
SMILE (2012 – 2017)	Satellite Mobile Innovation Laboratory and Engineering. Suite de plusieurs phases A interrompues (SDMB, A-TVS, SWIMAX) ; étude du potentiel et des implications des technologies spatiales pour les communications mobiles.	En cours (voir ci-dessous).

Tableau 1 – Les principaux projets dans le domaine des télécommunications grand public

Ajoutons, le programme TCS 21 qui répond, à plus court terme aux enjeux de compétitivité soulevés par les industriels. Une stratégie, se construit chemin faisant, avec une précision du contenu, tant en termes de concept, de connaissance ou d'écosystème, du champ d'innovation constitué par les « télécommunications spatiales grand public ».

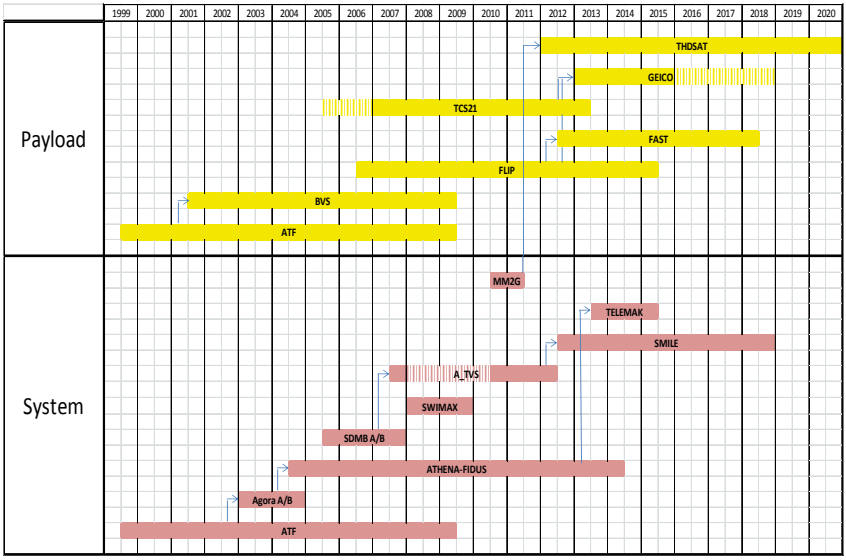


Figure 5 – Évolution des projets dans le domaine des télécoms grand public, 2000 – 2020

Afin de mieux comprendre la spécificité du management de ces projets étranges, il nous semble important d'analyser en détail deux cas emblématiques : FLIP et SMILE.

✷ DEUX ARCHÉTYPES DE PROJETS ÉTRANGES : FLIP (2006 – 2014) & SMILE (2012 – 2017)

Flip (2006 – 2014)

Le projet FLIP (pour *FLexible Innovative Payload*) constitue en quelque sorte l'archétype des projets étranges. Il a pour objet d'étudier le concept de flexibilité et ses implications pour la conception des charges utiles des futurs sa-

tellites. L'intérêt grandissant pour la flexibilité s'explique par l'augmentation de la durée de vie des satellites (qui suppose de pouvoir les faire évoluer une fois lancés pour s'adapter aux évolutions du marché) et par la saturation de la bande Ku (qui conduit les opérateurs à optimiser la capacité d'un satellite et suppose de pouvoir réallouer les fréquences une fois le satellite lancé en fonction des demandes des opérateurs).
Reste qu'on ne sait pas, au début d'un projet, quel est l'impact de la flexibilité sur la conception du satellite *(figure 6)*. Le plan de fréquence, la puissance, la couverture, doivent pouvoir être réalloués sans que la manière optimale pour le réaliser soit connue. La question est alors de savoir quelles technologies sont susceptibles de répondre à ces nouvelles exigences… sans augmenter les coûts.

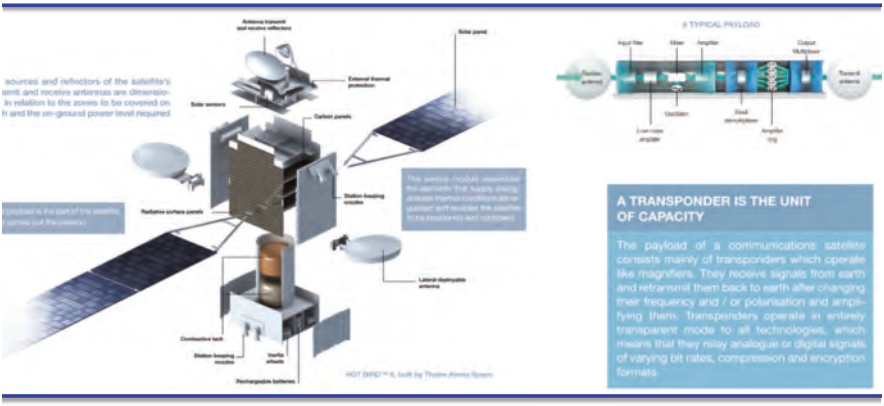


Figure 6 – Les satellites de télécommunication pour les nuls

À partir de là, l'équipe projet s'engage dans un processus de discussion avec les opérateurs satellites pour comprendre quelles fonctionnalités auraient le plus de valeur pour eux. Ce long processus passe par des dizaines de réunions afin de définir des spécifications pour les différentes composantes de la charge utile et explorer les solutions techniques. L'équipe projet révise les modes de conception des antennes pour aller vers des antennes flexibles, étudie l'usage des processeurs numériques transparents ou encore revisite les architectures de la charge utile. L'objectif de FLIP est bien de cartographier un espace de conception et d'explorer les pistes possibles. Prenons trois exemples des raisonnements de conception qui ont été menés.

- En 2007, lors de la revue d'exigence système, l'équipe projet se rend compte que sa vision du besoin des opérateurs est incomplète. Un important travail s'engage alors avec ceux-ci afin d'identifier les différentes missions. Au final, vingt-sept types de missions différentes, regroupées en sept familles sont identifiés ;
- En ce qui concerne les chaînes de conversion autour des processeurs numériques transparents, l'équipe identifie initialement quatre solutions qui ne donnent satisfaction ni en performance ni en coût. Lors de la revue de projet de 2009, le travail est scindé en deux parties : le développement d'une solution jugée suffisamment mûre pour satisfaire des besoins à court-terme et, en parallèle, l'exploration de solutions pour répondre aux missions identifiées en amont avec le maximum de *commonalités* pour éviter les sur-spécifications et les surcoûts. Ceci la conduit, après des débats serrés avec les industriels à concevoir trois types de produits dont l'un, que l'industriel avait rejeté au départ, volera deux ans plus tard.
- En ce qui concerne les antennes flexibles, le projet a conduit à la réouverture des modes de conception d'une antenne satellite. Le *dominant design* en matière d'antenne est alors mécanique. L'antenne est réalisée dans un moule pour lui donner la forme précisément adaptée à la couverture de la zone envisagée pour le type de signal à transmettre. Ce modèle est très peu flexible. L'équipe explore une autre solution qui vise à obtenir la couverture électrique désirée, sans chercher à optimiser la forme de l'antenne. On passe d'un modèle mécanique à un modèle mécano-électrique pour lesquelles différentes techniques sont envisageables. Différentes solutions sont étudiées. Certaines, non pour leur potentiel immédiat, mais en raison des compétences, fondamentales pour les futures antennes, qu'elles obligent à développer. C'est, par exemple, le cas de l'Array Fed Shaped Reflector-Passive (AFSRP), trop lourde, trop chère, et ne répondant qu'à un besoin secondaire mais dont l'étude (jusqu'au niveau du modèle électrique) suscite en France des procédés de fabrication très innovants : le brasage sous vide (technique d'assemblage) et les technologies ferrites qui jusque-là n'étaient maîtrisées que par une seule entreprise aux États-Unis. Aujourd'hui uniquement par EMS (États-Unis et Canada).

Ceci atteste de la diversité des « résultats » d'un projet comme FLIP et la spécificité des raisonnements qui y sont conduits. Précisons que FLIP engendre également des développements de produits. Les travaux sur les processeurs numériques transparents de seconde génération ont ainsi mis en évidence le besoin de passer à la troisième génération qui sera développée dans le cadre du projet FAST (fin 2012 – 2017).

La téléphonie mobile par satellite : de SDMB, Satellite Direct Mobile Broadcast (2004 – 2006) à SMILE, Satellite Mobile Innovation Laboratory and Engineering (2012 – 2017)

SMILE constitue un autre archétype de projet étrange dans lequel l'objet même du projet se définit en cours de route. La compréhension des enjeux du projet SMILE suppose toutefois une brève présentation des projets qui l'ont précédé. SMILE s'inscrit en effet dans une réflexion générale sur la place des technologies spatiales dans le domaine, en pleine expansion, des télécommunications avec les mobiles (voix, accès, diffusion de contenu multimédia). Si les communications par téléphone satellitaires existent depuis longtemps (système Iridium opérationnel depuis 1998), elles restent, jusque-là, cantonnées à des applications de niches. La question se pose donc de l'extension des techniques spatiales vers les applications grand public. Le projet SDMB (2004 – 2006) s'inscrit dans cette logique. L'objectif est de développer une solution de diffusion de contenu multimédia directement vers les téléphones mobiles dans les zones qui ne sont pas couvertes par le réseau terrestre et où le déploiement de ce réseau nécessite des investissements très importants au regard de la population concernée. Le satellite apporte une solution intéressante, techniquement et économiquement. Le projet est mené très rapidement. La phase 0 est conduite par le CNES. Par contre, à la différence d'AGORA[13], un partenaire industriel, Alcatel Alenia Space[14], se déclare comme opérateur potentiel d'un tel système satellitaire et se trouve impliqué dès la phase A. Ceci donne au projet une dynamique pour passer rapidement en phase B avec un co-financement privé. Les phases C/D/E sont ensuite entièrement prises en charge par un opérateur privé, Solaris, joint-venture créée pour exploiter ce nouveau marché par Eutelsat et SES. Une charge utile est lancée sur le satellite W2A. Malheureusement, l'antenne ne se déploie pas correctement, ce qui limite l'usage du satellite à des expérimentations. Le projet démontre l'intérêt des technologies spatiales pour les télécoms mobiles. Le CNES y gagne une crédibilité et communique sur ce type de solution, via des démonstrations.

S'ensuivent différentes phases A autour des applications possibles des techniques spatiales aux télécommunications mobiles : **A-TVS** étudie les

13 Le projet AGORA (2002-2004) visait à lutter contre la fracture numérique en proposant un accès internet en zone non couverte par les réseaux terrestres. Après une phase A ayant progressé rapidement, le projet s'est arrêté en phase B faute de financement.

14 Devenu Thales Alenia Space en 2007.

possibilités en matière de télévision sur mobile mais est rapidement mis en sommeil ; **SWIMAX** (2007 – 2009) lui succède et s'intéresse à la question de l'accès internet sur mobile beaucoup plus exigeant techniquement pour les satellites. Les études sont très riches mais le marché ne semble pas encore mûr pour ce type de solution. Le passage en phase B n'est donc pas décidé bien que la faisabilité technique ait été acquise en phase A. **En parallèle, le projet A-TVS** est réactivé pour étudier notamment les questions de standardisation. La possibilité d'utiliser le spatial dépend en effet de l'existence d'une bande de fréquence spécifique, de standards pour « *l'interfacer* » avec les autres éléments du réseau, de « chipset » dans les terminaux compatibles avec les techniques spatiales, etc. Avec le projet A-TVS, les acteurs du spatial s'impliquent dans les instances de standardisation pour défendre les solutions satellitaires et étudient des applications particulières (Engine pour la diffusion TV et M3 pour l'accès internet) d'où naîtra une définition favorable du standard NGH.

SMILE, décidé en 2012, débute à la suite de ces projets dont il tire les enseignements. L'enjeu est double. Il s'agit à la fois d'éviter que les solutions spatiales sortent de l'écosystème des télécommunications et, d'autre part, de se préparer au cas où une fenêtre d'opportunité s'ouvrirait. Les expériences précédentes ont en effet montré qu'une fois qu'un utilisateur est convaincu, les délais de conception sont extrêmement courts et qu'il est dès lors dangereux d'attendre l'expression d'une « demande ». Le projet SMILE comporte quatre volets différents :

- **Réglementaire :** mener des actions de lobbying pour conserver la bande S, condition de l'existence d'une solution spatiale.
- **Standardisation :** être capable de s'insérer dans les futurs standards ce qui suppose un travail technique pointu et des actions de communication pour porter un message structuré.
- **Projets collaboratifs :** qui constituent un levier pour travailler avec d'autres acteurs et positionner le satellite dans des solutions existantes.
- **Mise en place de moyens au cas où on passe en phase B :** SDMB a montré que les calendriers sont extrêmement compressés, d'où la nécessité de développer en amont les compétences et les outils de conception nécessaires.

L'objectif est de parvenir à une revue d'architecture courant 2014 soit la présentation d'une vision des opportunités mission et des moyens à mettre en œuvre pour les remplir à différentes échéances temporelles. Le scénario

le plus probable à moyen terme est a priori celui du multimédia mobile (M^3)[15] et, à plus longue échéance, une évolution de SWIMAX. L'équipe travaille également, à plus courte échéance, sur la conception de la première version d'une série d'outils d'aide à la conception (modèles d'ingénierie, banc de test labo, logiciel de simulation des performances des protocoles, etc.) qui seront ensuite améliorés pendant le projet.

VERS UN MANAGEMENT DES PROJETS D'EXPLORATION

Quels enseignements tirer de cette description de l'évolution des projets dans le domaine des télécoms mobiles ? En premier lieu au regard de la logique des processus du CNES, on peut qualifier ces projets d'*étranges*. Ils sont rarement orientés vers la conception d'un objet ou d'un instrument destiné à être lancé dans l'espace, ils transgressent ce processus en éliminant certaines phases, en comprimant et/ou allongeant leur durée ; enfin, ils définissent des objets déviants par rapport à ce qui est habituellement attendu. Mais, ils positionnent les technologies spatiales sur un domaine en évolution rapide et dans lequel le CNES n'est qu'un acteur périphérique doté d'une mission, fort vaste, de « soutien à la compétitivité ». Ce décalage est pleinement identifié par les personnes rencontrées qui, toutes, soulignent les difficultés pour satisfaire aux exigences des processus projet (« *On ne peut être que mauvais élève* »).
Deux interprétations de cette situation sont possibles. La première souligne la capacité d'adaptation du CNES qui, in fine quand cela est nécessaire, réussit à adapter ses procédures. Pourtant, se limiter à cette capacité d'adaptation nous semble restrictif car cela conduit à ignorer ce que le domaine des télécommunications a de spécifique et les leçons à en tirer pour le management de l'innovation. La seconde interprétation compare la dynamique présentée précédemment à une *forme de management de domaine d'innovation*, tel qu'observé dans des entreprises comme Valéo ; il serait possible de s'en inspirer pour piloter l'exploration de domaines caractérisés par une forte incertitude tant sur la technique que sur les usages.

Éléments de définition et principes de management

Au-delà de la question de la gestion du domaine dans son ensemble, se pose celle de la gestion de ces « projets étranges ». Notre recherche nous incite à les considérer comme des projets d'exploration. Précisons les spécificités de

15 http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-VERS-0010

leur gestion. Ces projets possèdent cinq caractéristiques identifiables dans les projets précédents :

- Ils sont émergents et stratégiquement ambigus.
- Ils relèvent d'une démarche proactive du fait de l'absence de client.
- Le résultat du projet est difficile à spécifier au commencement.
- Ils nécessitent l'exploration de nouvelles poches de connaissances.
- L'urgence est masquée[16] et les horizons temporels multiples.

Dans cette situation, le modèle traditionnel de gestion de projet est inopérant car l'incertitude est omniprésente, il est impossible de spécifier ex-ante le résultat, d'identifier les risques et de définir un planning. La littérature révèle alors un processus plus ou moins chaotique de « *search on a rugged landscape* » *(figure 7)*.

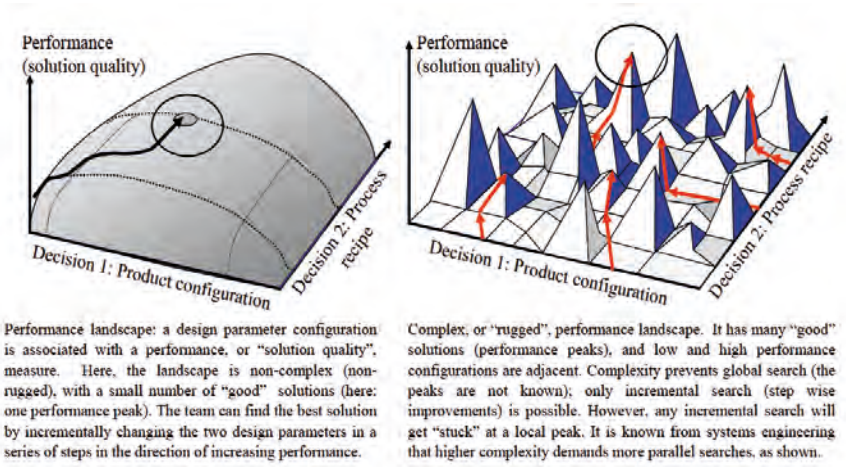


Figure 7 – Projet de développement vs. projet d'exploration (Sommer & al, 2009)

Toute la difficulté est alors de définir des méthodes de gestion adaptées à ce type de projet puisque les processus classiques de gestion de projet sont inadaptés. La littérature met en évidence plusieurs points importants quant à leur management, notamment (Lenfle, 2008) :

16 On a l'impression d'avoir le temps mais en fait les fenêtres d'opportunité pour faire adopter une innovation sont 1) peu nombreuses, 2) étroites, 3) situées plusieurs années avant le lancement effectif du satellite.

- *La nécessité de différencier les méthodes de gestion* selon la nature des projets. La littérature est formelle sur ce point : l'application aveugle d'une seule méthode, a fortiori quand elle met l'accent sur le contrôle du processus, amène une réduction de la capacité d'innovation de l'organisation par élimination des projets considérés comme trop risqués (Tushman & O'Reilly, 1996 ; Christensen, 1997 ; Burgelman, 2003 ; Shenhar & Dvir, 2007).
- *Le rôle central de l'expérimentation afin de préciser progressivement* tant l'(ou les) objectif(s) à atteindre que les moyens d'y parvenir. On voit par exemple se dessiner des stratégies originales consistant, en l'absence de connaissances suffisantes et en raison du manque de temps, à explorer simultanément différentes solutions pour choisir le plus tard possible la plus satisfaisante (Loch & al, 2006 ; Lenfle, 2011).
- *L'importance de travailler simultanément sur les dimensions techniques et celles des usages* (stratégie dite d'exploration concourante, Gastaldi & Midler, 2005) afin d'éviter les pièges classiques de la technique qui ne sert à rien ou de l'usage inatteignable.
- *La nécessité de repenser les modes d'évaluation de ces projets* qui n'aboutissent pas nécessairement à des réalisations concrètes, mais engagent l'élaboration de connaissances importantes pour l'organisation. Plus que la convergence vers un objectif, c'est la richesse de l'exploration qui importe ici, sa capacité à identifier les concepts pertinents, les enjeux, les connaissances nécessaires (Hooge, 2010 ; Lenfle, 2012). Le chemin parcouru est aussi important que les objets réalisés.
- En conséquence, le projet devient un processus réflexif d'apprentissage au cours duquel les objectifs se précisent chemin faisant. C'est le rendement croissant des itérations (chaque expérience permet petit à petit de préciser où l'on va et comment) qui permet de voir si le projet « progresse » ou si, au contraire, il ne parvient pas à construire un espace de conception.

Un modèle de management des projets d'exploration se dessine peu à peu, nourri par les enseignements de la littérature en management de l'innovation. Face à l'impossibilité de définir ex-ante l'objectif à atteindre tout autant que les moyens d'y parvenir, le projet fonctionne par cycle d'essais et d'apprentissage. Peu à peu, il devient possible de comprendre les enjeux, les concepts intéressants, les connaissances, l'écosystème à créer. On voit ce modèle de management se mettre en place dans certaines organisations pour lesquelles il s'agit d'un enjeu majeur telle la DARPA (voir encadré page suivante). Nous pensons que le cas des télécommunications spatiales montre sa pertinence pour le CNES et, déjà, l'existence de son fonctionnement.

La gestion des projets d'exploration au CNES

Les entretiens menés au sein de l'entité DCT/PO/TN montrent que la gestion des « projets étranges » se rapproche de ce modèle. On y retrouve les cinq caractéristiques des projets d'exploration : absence de demande formelle, complexité du positionnement du projet dans la stratégie du CNES, difficulté à spécifier l'objectif à atteindre et le résultat attendu, nécessité d'explorer de nouvelles connaissances, situation d'urgence masquée dans laquelle on a l'impression d'avoir le temps alors qu'en fait, quand elles s'ouvrent, les fenêtres d'opportunité sont extrêmement étroites et se referment très vite.

De plus, la logique d'action de ces projets correspond à celle décrite par la littérature de référence sur la question. Étant donné le niveau d'incertitude auxquels ils sont confrontés, les projets d'exploration fonctionnent selon des processus itératifs d'apprentissage par l'expérimentation dans laquelle l'équipe formule des hypothèses, les teste et adapte son action en conséquence *(voir Loch & al. 2006 et figure 8)*.

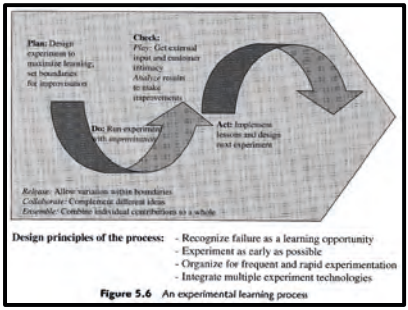


Figure 8 – Les projets comme processus d'apprentissage par l'expérimentation (Loch & al, 2006)

Dans ces projets, les démonstrateurs, les prototypes constituent le moteur du processus d'apprentissage. Ils ont des rôles multiples, à la fois moyens de tester une technique, d'explorer les usages, de communiquer vis-à-vis de l'extérieur et du CNES, de recruter des alliés et, last but not least, de mobiliser les équipes autour de la spécificité des raisonnements de conception en situation d'exploration. Nous voudrions souligner cette spécificité. En effet, contrairement à un projet de développement, l'objectif n'est pas seulement, voire pas principalement, d'aboutir à la réalisation d'un objet. Il s'agit, au contraire, de construire des compétences et des outils de conception qui, en-

suite, pourront servir à développer différents types d'objets. FLIP est particulièrement intéressant à cet égard car il explore un concept, la flexibilité, dont le sens n'est pas donné a priori, avec pour objectif de construire une capacité de réponses à une grande diversité de demandes si elles se matérialisent. La séquence suivante en propose l'analyse détaillée.

Gérer les projets d'exploration : l'exemple de la DARPA (Dungan & Gabriel, 2013)

La DARPA (pour Defense Advanced Research Project Agency) est une agence qui dépend du ministère de la défense américain. Comme son nom l'indique elle est en charge de l'exploration de concepts en rupture qui restent toutefois toujours orientés vers des applications, à la différence de la recherche fondamentale. On lui doit ainsi une série d'innovations majeures dont certaines ont transformé notre quotidien (Internet, les MEMS, les technologies furtives, le GPS, etc.)

L'intérêt pour notre sujet est que la DARPA fonctionne exclusivement par projets qui sont lancés soit parce qu'un besoin émerge que les techniques actuelles ne peuvent résoudre (ex : un appareil volant à Mach 20 pour joindre n'importe quel point de la planète en 60 mn) ; soit parce qu'un champ scientifique a atteint un degré de maturité suffisant pour résoudre des problèmes pratiques (ex : les MEMS en 1990). L'idée est que ces projets ne peuvent avancer suffisamment vite « *without pushing or catalizing science* », d'où le recours aux projets. Reste que les projets dont il est question n'ont rien à voir avec ce que l'on entend traditionnellement par là.

1. Ils regroupent des experts d'un ensemble d'organisations, placés sous la direction d'un directeur de projet de haut niveau, pour une durée fixée à l'avance (5 ans maximum) afin de créer un sentiment d'urgence (« *Another benefit of limited tenures is that — combined with a clearly articulated important need and a scientific challenge — they create a sense of urgency* »)
2. Le directeur de projet n'est pas un membre permanent de la DARPA, il est sous contrat pour la durée du projet.
3. La majorité du travail est sous-traité en fonction des besoins du projet aux meilleures universités et entreprises travaillant sur la question. Les participants se rencontrent au moins deux fois par an.
4. La DARPA est parfaitement consciente que les méthodes de management de projet traditionnelles sont inopérantes dans ce cas de figure. Dugan & Gabriel (2013) sont très clairs sur ce point. Ces projets « *involve fast iterations. Planning should be light and nimble. Progress can*

be assessed by tracking iterations to see if they are converging on goals, revealing dead ends, uncovering new applications, or identifying the need for unforeseen scientific advances. Insisting that a team steadily hit milestones established in initial plans can cause it to adhere to a path that — based on something the team has learned — no longer makes sense. Sometimes a setback or a failure is the most effective tool for discovery. If people working on a particular piece of a project experience a failure, it's often because something they encountered surprised them. That's to be expected in high-risk projects. When such events occur, the project leader has to let the team members press forward as long as they can see that the approach might ultimately work within project constraints, even if they deviate from the original course.» Par conséquent : «*Project leaders are focused on managing constant flux — building, replanning, changing tack, and moving talent in and out as needs shift*»

5. Les ressources sont constamment réallouées en fonction de l'évolution des projets et des enjeux de la DARPA («*The DARPA model also allows a company to alter its portfolio of projects faster and at a much lower cost than a conventional internal research organization can. During our recent tenure at the agency, we were able to shift significant investments from programs in space and large air and ground systems to programs in cybersecurity, synthetic biology, and advanced manufacturing in less than a year. Individual performers can be quickly reassigned to new work as well. If an organization involved in the project isn't getting results but its work is important to achieving program objectives, its efforts*»).
6. La DARPA bénéficie d'un appui de haut niveau au sein du DoD pour garantir son indépendance et la spécificité des critères d'évaluation des projets.

Site internet de la DARPA : http://www.darpa.mil/

✷ EXPLICITER LE FONCTIONNEMENT DES PROJETS D'EXPLORATION À PARTIR DE L'ANALYSE FINE DU PROJET FLIP

Précisons que FLIP a débuté comme un projet normal. Les besoins clients semblaient avoir été identifiés et la R & T disposait de solutions techniques prometteuses. L'équipe, confiante, avait donc décidé de débuter directement en phase B par la conception détaillée. Cependant, comme l'explique le chef de projet : « *Bon il s'est avéré que (rire bref)… Un, les solutions qui étaient proposées en sortie de R & T se sont pour certaines avérées totalement non compétitives et, ensuite, on a décidé en parallèle de refaire un travail avec les opérateurs* ; *on a refait une passe sur les besoins des principaux opérateurs. On a creusé avec eux au-delà du concept, cherché quelles seraient les missions concrètes qui les intéresseraient par rapport à leur flotte actuelle. Au lieu de partir avec deux ou trois types de missions, toutes les missions potentielles ont été envisagées avec les opérateurs dans un dialogue qui a duré environ un an et demi. C'est long pour des opérateurs qui travaillent sur les enjeux immédiats et ce n'est pas facile pour eux de dévoiler leur stratégie. Qu'est-ce que ça veut dire quand on veut tester un marché ? Quand on veut changer de position orbitale ? Sept familles de missions correspondant en gros à vingt-sept missions ont été définies. Donc on s'est rendu compte que le besoin au début on l'avait philosophiquement cerné et ça n'a pas changé, par contre on manquait de connaissance sur l'application concrète, et ce que ça voulait dire en termes de mise en œuvre*]. »[17]

À partir de cette nouvelle compréhension du besoin, le projet Flip est réengagé dans une phase 0/A. Les solutions proposées initialement sont abandonnées afin d'en concevoir de nouvelles. Comme l'explique le chef de projet, « *environ 50 % des études de R & T étaient inutiles donc il a fallu refaire de l'ingénierie amont.* ». Le projet doit dans le même temps, explorer le plus largement possible les solutions techniques et les besoins à moyen terme, et satisfaire les besoins à court terme des industriels. Une stratégie originale, à notre avis typique des projets d'exploration se met en place. En 2009, quatre solutions (appelons-les A, B, C, D) sont à l'étude pour la conception des chaînes de conversion (CC). Le chef de projet explique alors le processus de décision et le raisonnement sous-jacent :

« *La solution A existe, la B est à développer, la C est un héritage d'un truc qui peut exister ; on ne met pas la priorité dessus et la D est la plus critique*

17 Toutes les citations proviennent de deux entretiens avec le chef de projet FLIP en juillet 2013 et janvier 2014.

car elle est flexible et exigeante en performance. Là, potentiellement, c'est compliqué. La revue de D arrive et on prend la décision de dire qu'elle n'est pas concluante. Les performances n'étaient pas atteintes et on sentait que le problème n'était pas complètement cerné. On n'avait pas mené le dossier à *bout [...] on voit qu'on est en train de concevoir quelque chose qui n'est pas conforme à sa spécification, qui globalement représente l'un des cas mais ne les couvre pas tous ; on se pose la question de remettre à plat tout le dossier. On se rend compte aussi que l'architecture de D, soulève des questions : est-elle compatible quand on va sortir en Ka* ? *En termes d'accommodation de l'Oscillateur Local* ? etc. On n'est pas assez loin. Donc on n'accepte pas la revue et on remet à *plat. Mais par contre, puisque D est compatible pour certaines solutions [dites Ku/Ku] pour lesquelles on n'est plus hors spécifications, et pour ne pas retarder le développement, on continue à développer ce Ku/Ku qui correspond à des architectures anciennes et permet un peu de flexibilité. On part là-dessus et on se laisse le temps pour rebâtir le reste. Cela va défricher ce qu'on peut faire dans ce domaine, en plus c'est un produit qui a du sens car il peut exister dans une charge utile classique. Il a déjà d'ailleurs été vendu pour Intelsat sur 8WB. Donc on a eu raison de le faire car c'est un produit qui risque d'avoir du succès. Par contre on remet à plat toutes les chaînes de conversion autour des processeurs numériques transparents pour pouvoir couvrir les différentes missions. C'est une tâche très complexe car le nombre de combinaisons possibles en termes de fréquence est très important (S/Ku, S/Ka*[18]*, Ku/Fi, C/Fi...). Donc pour répondre aux besoins des opérateurs on est amené à avoir un nombre de produits très important. [...] [par conséquent] il faut assurer obligatoirement dans ces développements une synergie industrielle. On ne peut pas développer puis voir comment on adaptera. [...] Et là il y a un an de boulot pour remettre tout ça à plat car après c'est des problèmes très fins [pour gérer la combinatoire des possibilités].* »

Notons que ce type de raisonnement ne se limite pas aux chaînes de conversion mais a été appliqué à tous les composants. Nous nous limiterons aux missions et aux chaînes de conversion mais on trouverait une logique similaire dans le domaine des antennes.
Notre ambition est d'illustrer avec cet exemple, le basculement par rapport à une logique projet *stage-gate* standard. Nous nous appuyons sur le forma-

18 S, Ku, Ka, C correspondent à des bandes de fréquences définies dans le cadre de l'union internationale des télécommunications, Fi signifie fréquence intermédiaire. Aujourd'hui, on utilise majoritairement des conversions Ku/Ku, Ka/Ka

lisme volontairement très simplifié[19] de la théorie C/K (voir Hatchuel & Weil, 2009). Il est possible de schématiser les différences entre la logique du développement et celle de l'exploration. En situation projet classique *(figure 9)* un cahier des charges existe et les connaissances sont disponibles, ce qui permet de lancer le projet vers une cible clairement identifiée au départ. C'est ce que l'on pensait possible pour FLIP au départ.

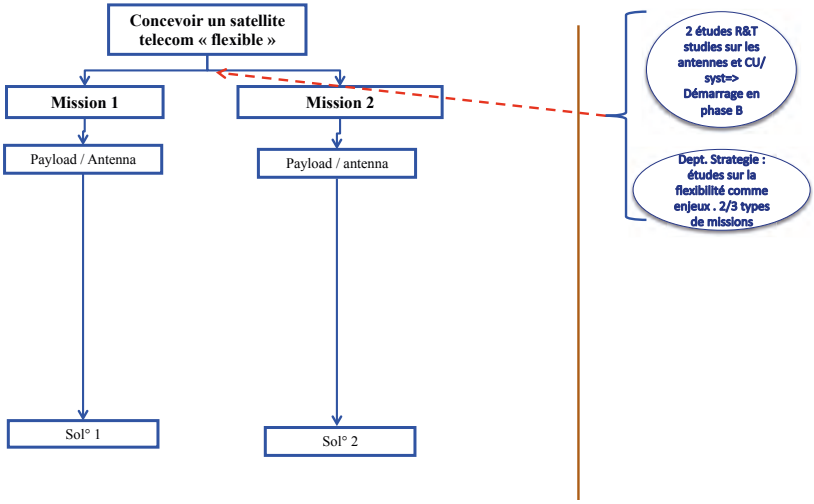


Figure 9 – Situation projet classique

Or, ce qui s'est passé dans le cas FLIP répond à une logique très différente ; la logique de conception réglée qui sous-tend le développement est intenable car la base de connaissances n'est pas suffisante. Dans les projets d'exploration, on ne peut pas faire l'hypothèse que l'objectif est clairement défini au départ et que les moyens sont disponibles. De fait, la notion de flexibilité remet en cause le modèle d'objet et les règles de conception qui permettent la progression dans le concept. Par conséquent, le travail initial est rapidement stoppé pour réexplorer le besoin, ré-ouvrir le concept (étape 1). Cela permet de (re) définir un grand nombre de missions à partir de sept « familles ». Ensuite pour les satisfaire, quatre solutions de chaîne de conversion sont identi-

19 Notre objet n'est pas de reconstruire de manière détaillée l'ensemble du processus de conception. Ceci demanderait un effort beaucoup trop important et n'est pas nécessaire. Nous cherchons ici à illustrer deux logiques différentes.

fiées mais ne donnent pas satisfaction (étape 2). L'une d'entre elles est quand même développée pour répondre à des besoins à court terme mais, en même temps, un important travail de cartographie est lancé qui aboutit à la conception de trois produits génériques qui permettent de couvrir l'essentiel des besoins identifiés. Ce travail aboutit à des produits et des démonstrateurs, mais aussi à la révision des modèles de conception des chaînes de conversion (étape 3). Nous observons donc une double expansion des C et des K typique des projets d'exploration *(figure 10)*.

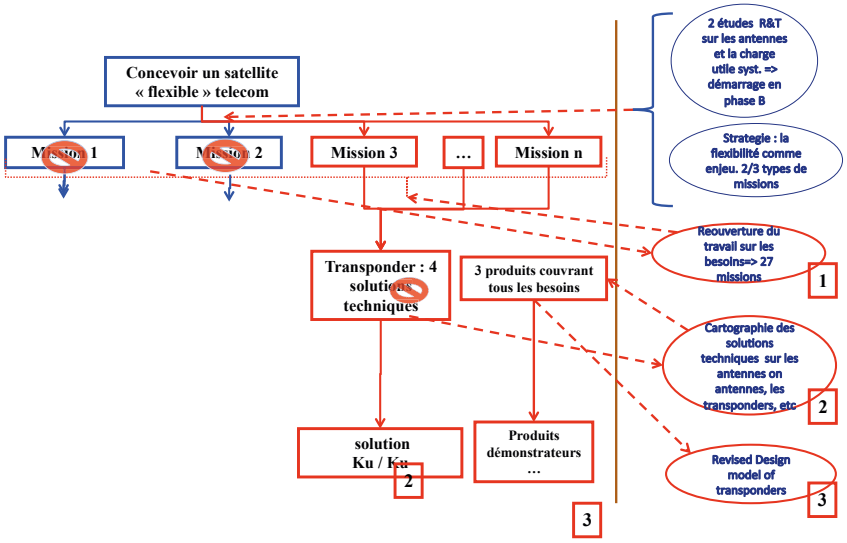


Figure 10 – Double expansion typique des projets d'exploration

Ceci montre que, dans les projets d'exploration, la compréhension de l'espace de conception dans son ensemble est aussi importante que la convergence vers un objet précis. C'est par ce travail, beaucoup plus générique que celui d'un projet de développement, que l'on parvient à construire une capacité de réponse à des usages incertains. On voit notamment ici que l'objectif n'est pas de converger le plus rapidement vers la réalisation d'un produit sous contrainte de Coûts/Qualité/Délai.

Ici, *a contrario* :

- L'étude sur les antennes conduit ainsi à réviser les modèles de conception dominants en explorant, par exemple, l'intérêt d'une conception mécano-électrique ;

- L'antenne AFSRP est étudiée alors même que l'on connaît ses limites (coût, poids), car elle permet de développer des compétences génériques qui seront réutilisables ensuite (brasage sous vide, technologies ferrites) ;
- L'étude des chaînes de conversion commence par se concentrer sur les solutions qui semblent les plus évidentes, avant d'être stoppée pour réétudier la question, remonter en généralité et construire une offre beaucoup plus générique[20].

Pour toutes ces raisons, FLIP constitue un cas emblématique des projets d'exploration ; il en comporte toutes les spécificités :

- Difficulté à spécifier ex-ante le résultat
- Remise en cause de la logique classique séquentielle des projets. On voit bien ici que les solutions « sur étagères » de la R & T ne fonctionnent pas, que les phases se chevauchent avec des retours en arrière et des accélérations, qu'écouter les utilisateurs[21] n'est pas forcément une bonne idée…
- Multiplicité des temporalités et la nécessité, typique des projets d'exploration, de gérer constamment la tension entre le court et le long terme, le développement et l'exploration la plus large possible
- Révision des modes de raisonnement traditionnel du développement et développement de nouvelles règles de conception qui remettent en cause le « dominant design »
- Diversité des résultats qui sont plus complexes à évaluer que dans les projets standards. FLIP permet d'en montrer la diversité : (a) produits qualifiés (EQM) (b) prototypes démontrant l'utilité et la faisabilité d'une solution, (c) cartographie de l'espace de conception défini par le concept de flexibilité, (d) nouveaux modèles de conception réutilisables pour des projets futurs, (e) nouvelles compétences comme dans le cas de l'antenne X.

Notons pour conclure cette section que cela dessine le portrait de projets très altruistes. Fondamentalement l'objectif de ces projets est d'en préparer d'autres, plus proches du développement. Ils effectuent le travail d'exploration qui permet ensuite de concevoir des lignées de projets qui s'appuient sur les connaissances et les concepts qu'ils ont étudié (Le Masson & al, 2006 ; Maniak & al, 2014). Comme l'explique le chef de projet de FLIP : « *La fertilisation*

20 Dans le langage formel de la théorie C/K cela revient à remonter dans l'arbre de conception et à construire de nouvelles K pour ensuite proposer un ensemble de solutions génériques et leur domaine de pertinence

21 « voice of the customer »

*dans ce truc-là est énorme, y compris hors des télé*com*munications et de la flexibilité. C'est un point qu'on essaie toujours de prendre en compte. Là aussi c'est un peu bizarre car dans un projet les gens raisonnent en fonction du composant dont ils ont besoin pour leur objet, c'est tout. On essaie de casser cette logique du respect à la lettre des spécifications. Mais on n'a pas l'*épée de Damoclès *du respect des délais et du coût. Si on l'avait, on aurait la même pression.»* Dans cette perspective, il insiste particulièrement sur le développement de nouveaux modèles de conception : «je dirais presque que c'est le résultat majeur de FLIP [...] *maintenant qu'on a mené cette réflexion, on la conserve pour les projets futurs. Par exemple le projet THD-Sat qui a démarré où il y de nouveaux convertisseurs à faire au début ça partait plein pot sur un héritage pas très bien réfléchi et on a dit «non, non», avec ma collègue, on a dit on va adopter le même processus que FLIP et remettre en perspective l'ensemble des CC.*»

À l'opposé de l'approche standard, ces projets cartographient un espace de conception inconnu et construisent des compétences, au lieu de s'appuyer sur celles qui existent pour atteindre un objectif clairement défini. Le projet, constitue ainsi un mode intéressant pour structurer l'exploration.

Évaluation et pilotage des projets d'exploration

Au final, nous observons ici un nouveau type de projet tant en termes de logique que de résultats. Ces projets d'exploration répondent aux exigences d'une compétition par l'innovation toujours plus forte. Or, comme nous venons de le voir, organiser l'exploration par projet suppose d'inventer des modes de management adaptés aux spécificités de cette situation (Loch & al, 2006 : Lenfle, 2008 & 2016). Le cas FLIP a permis de préciser encore la logique de ces projets et la diversité de leur résultat. La difficulté à laquelle sont confrontés les acteurs vient de l'écart entre ces projets et ce que l'on entend habituellement par projet au CNES. La remise en cause du modèle dominant est en effet profonde. Si on les compare au modèle standard, les projets d'exploration ressemblent effectivement au tableau de Bosch : bizarres, mal définis, difficiles à comprendre, sans signification évidente. Et de fait, au cours de nos entretiens, les chefs de projets ont souligné la difficulté à gérer ces projets au sein des processus du CNES. Comme l'explique le chef de projet SMILE : *«on ne peut être que mauvais élève.* [...] *même construire le plan de travail est compliqué. [...] Je me suis retrouvé en réunion de montage de projet, on m'y demande de préciser mes demandes de budget sur des trucs alors* même *qu'on est un peu dans le flou sur ce qu'on veut faire. On a essayé de les présenter sous une forme acceptable.*» Le problème est plus compliqué lorsque «*on s'adresse à des gens qui ne sont*

pas du domaine et qui ne connaissent absolument pas les enjeux ». Ce que reconnaît Michel Faup quand il explique que « *SMILE est un objet flou, les gens hors de l'équipe projet comprennent mal ce qu'il fait* ». Le risque est alors grand, si l'on essaie de respecter la procédure à tout prix, de « *développer un mauvais produit car on s'est mis une contrainte de planning* [trop stricte] ». Et, de fait les projets précédents ont quasiment tous transgressés ce processus en éliminant certaines phases, en comprimant et ou allongeant leur durée, en définissant des objets déviants par rapport à ce qui est habituellement attendu. Comme on nous l'a expliqué, « *la seule solution pour survivre c'est de les maquiller, avec un nez rouge s'il faut un nez rouge, des chaussures blanches, une cravate jaune…* ».
Cette stratégie de contournement, observé très fréquemment en management de l'innovation, ne peut être qu'un pis-aller. L'enjeu, au contraire, est de reconnaître la spécificité des projets d'exploration et de différencier les processus de gestion en conséquence. Les exemples que nous venons d'étudier montrent que le management par projet est pertinent pour gérer l'exploration. Trois points ressortent particulièrement des entretiens : l'orientation vers des objectifs pratiques, la capacité à rythmer l'exploration et la création d'un collectif.

L'orientation vers des objectifs pratiques

En ce qui concerne le premier point, les différents chefs de projets sont unanimes à reconnaître qu'une organisation par projet est fondamentale et différente à la fois, de la R & T, et du développement. Comme le résume Michel Faup « on *n'explore pas pour explorer* », ce que le chef de projet FLIP résume en « on essaie d'être pragmatiques […] *il faut qu'on fasse quelque chose qui marche de la manière la plus efficace possible* ; *parfois en faisant fi de l'innovation. On n'essaie pas forcément de faire de l'innovation, on essaie de répondre le plus efficacement à la manière dont on voit l'objectif. […] On ne cherche pas à défricher un tas de trucs. On essaie de se donner un maximum de chances que ces choses-là servent à quelque chose par la suite ; alors qu'en R & T on cherche tous azimuts. On a des contraintes de coûts, de délais et de faisabilité* ». Le chef de projet SMILE ne dit rien d'autre quand il affirme « *nous ne sommes pas comme les métiers qui mettent en place des outils pour eux-mêmes, nous travaillons pour des futures phases A ou B. On se place dans un enjeu global et on rend des comptes à chaque revue de projet.* » Et effectivement ces projets d'exploration ne flottent pas. Ils doivent composer avec les contraintes de C/Q/D traditionnelles. Les revues de projets servent ainsi à discuter ce qui se passe, identifier les pistes pertinentes, définir les prochaines étapes. Comme nous l'avons vu, le cahier des charges est ici le résultat du projet plutôt que son point de départ. Nous

sommes d'ailleurs maintenant capables de préciser les résultats de ces projets : EQM, prototypes, modèle de conception, nouvelles compétences.

Rythmer l'exploration

Une importante difficulté de l'exploration est qu'elle semble sans fin. L'organisation par projet apporte des réponses intéressantes via les revues de projet et la définition d'une fin du processus à deux questions : Comment décider que le projet est terminé ? Comment rythmer le processus ?

Les personnes rencontrées insistent sur le rôle fondamental des revues de projet. Le chef de projet SMILE explique ainsi qu'elles apportent « *une grosse plus-value par rapport à l'action individuelle. Le projet rend des comptes collectivement vers l'extérieur.* Ça rend visible *des enjeux, ça donne des échéances, ça oblige à rendre des comptes, c'est à la fois des contraintes mais aussi des enjeux et des critiques. [...] Ça donne du sens* ». Et de fait, la logique projet qui suppose cette évaluation régulière évite la dispersion et le flottement de ces projets. Les revues de projet jouent un rôle central dans leur management. Évidemment, à la différence d'une revue de projet classique lors de laquelle on évalue la convergence vers les spécifications, l'enjeu est ici de discuter collectivement l'évolution du projet, de donner du sens à l'action.

De plus la forme projet permet également de définir une fin du processus d'exploration. La difficulté, par rapport à un projet de développement, est que cette fin n'est pas nécessairement assimilée à la réalisation d'un objet, qui marque de manière évidente l'aboutissement du projet. La question est donc de définir quand il est temps d'arrêter l'exploration. Le travail réalisé dans le domaine des télécommunications montre que l'on peut identifier trois critères (non exclusifs) :

- Le budget est épuisé.
- Le projet a atteint la date de fin prévue.[22]
- Le champ d'innovation a été suffisamment étudié.

FLIP permet d'illustrer comment ces critères ont déterminé la fin du projet. Le chef de projet explique ainsi que le projet se termine « *quand on arrive au bout des budgets et de la date. Pour FLIP la date de fin prévue est 2014 : les investissements seront finis, les produits là et recettés... mais ça ne nous empêche pas en parallèle de réfléchir à leur évolution. Il faut en permanence mettre en perspective ce que l'on fait. Mais globalement : soit on obtient plus*

22 Notons que cette logique prévaut à la DARPA où la date de fin du projet est fixée dès le départ et ne peut dépasser 5 ans.

de sous, soit on a plus d'idées, c'est l'un ou l'autre. Ou alors on sort de la thématique mais ça on n'a pas le droit. Par exemple le segment sol n'est pas dans le scope et sera étudié dans un autre projet (GEICO). Mais aujourd'hui pour la flexibilité, on a ce qu'il faut ».

Cette citation met en évidence deux critères pour évaluer les projets d'exploration :

- Une forme de « saturation théorique », les études n'apportant plus d'éléments suffisamment nouveaux sur la conception explorée au départ ;
- Un critère de générativité c'est-à-dire, la capacité du projet à donner naissance à d'autres projets qui vont permettre de creuser l'étude des pistes identifiées pendant l'exploration.

Structurer l'exploration par les projets

Reste enfin, et c'est la troisième contribution de l'organisation par projet, la question de l'organisation du processus d'exploration. La littérature montre en effet que le principal risque de l'exploration réside dans l'éparpillement et la faible coordination du processus : dans différentes parties de l'organisation, des gens travaillent de manière plus ou moins coordonnée sur la même question. La mise en place d'un projet constitue une solution pour éviter ce piège. Les responsables de FLIP et SMILE insistent sur ce point. Suivons les :

> *« Chaque métier pris isolément n'aurait pas d'intérêt pour les partenaires ; là, le fait d'agréger permet d'avoir une masse critique. Et les gens métiers s'y retrouvent car ça permet de créer du contact sur leur domaine, ça crée de l'émulation. Après c'est vrai qu'il n'y a pas un vrai système… Je trouve qu'il faut se voir, il y a aussi des enjeux humains, l'impression de faire bouger les lignes ensemble. […] Les revues [de projet] c'est une grosse plus-value par rapport à l'action individuelle. »*
>
> *« Ça crée une cohérence, une dynamique formidable. Au lieu de faire des petites actions de R & T les équipes savent que derrière on va aussi faire des produits ; il y a une logique de développement, on intègre la question des interfaces entre tous ces produits, des systèmes, etc. Il faut qu'il y ait le processeur numérique transparent et la chaîne de conversion autour. Un processeur numérique transparent seul ne volera jamais et tout ça fait partie du projet mais en plus on essaie de réfléchir au-delà. »*

Ces deux citations démontrent les potentialités offertes par l'approche par projet pour créer une dynamique, un élan et des liens entre des acteurs qui, autrement, resteraient dispersés. C'est là une des caractéristiques fondamentales de l'organisation par projet ; elle est d'autant plus importante dans des contextes très incertains.

À la rencontre des usages opérationnels : le long chemin des radiances

Sylvain Lenfle, professeur au CNAM et chercheur au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.

Directeur de travaux de master et de thèses consacrés à l'étude de la valorisation des données d'observation de la Terre pour des enjeux environnementaux, Sylvain Lenfle a observé que tous les acteurs considéraient l'usage des données satellite par la météorologie comme le modèle emblématique d'une appropriation opérationnelle réussie des mesures établies par les dispositifs d'observation spatiaux. La lecture d'articles scientifiques introduisant une autre vision, l'a incité à enquêter. Sa recherche met à jour le processus complexe et long qui a engendré le saut qualitatif en prévision numérique du temps. Son enquête a nécessité un retour vers les étapes de la construction de la météorologie spatiale pour la prévision numérique du temps, l'histoire en est détaillée dans le chapitre suivant. Pour tous ceux qui sont préoccupés par le développement des usages des mesures satellitaires par des acteurs opérationnels, cette recherche de Sylvain Lenfle, éclaire les conditions à prendre en compte dès la conception initiale de la mission pour que celle-ci ne se limite pas à une très belle expérience scientifique sans lendemain.

GENÈSE ET PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE

Les systèmes d'observation de la Terre ont depuis longtemps démontré leur efficacité pour étudier une grande diversité de phénomènes naturels, de la prévision météorologique à l'océanographie opérationnelle en passant par l'analyse de l'humidité des sols. Leur couverture globale et la précision des mesures réalisées en font des outils absolument incontournables pour la

science, l'industrie et, plus généralement, la société. Ils sont notamment largement utilisés dans l'étude du changement climatique et de ses effets. De manière plus récente, ces outils sont aussi présentés comme essentiels dans la mise en place de « services climatiques » qui sont censés constituer un élément essentiel des stratégies d'adaptation au changement climatique, aux niveaux national, régional ou local. C'est une des principales justifications du programme européen Copernicus (ex-GMES).

Sur un plan théorique, l'enjeu ici est de gérer ce qu'Elinor Oström (Prix Nobel d'économie 2009) appelle des *Common-Pool Ressources*[1] c'est-à-dire des ressources communes (lacs, forêts, nappes phréatiques et, probablement, l'océan et l'atmosphère[2], etc.) qui, si elles ne font pas l'objet d'une gestion collective, risquent la dégradation ou l'épuisement. Les travaux d'Oström (1990, 2010) démontrent qu'une des conditions de la gestion de ces *Common-Pool Ressources* est l'existence d'information sur l'état de la ressource afin d'évaluer sa situation, de suivre son évolution et de la gérer collectivement (*mutual monitoring*).

Nos recherches montrent que la conception et la mise en place d'un système d'information environnementale constitue un processus long et complexe dans lequel le rôle d'une agence spatiale n'est pas évident. Il est ici utile d'identifier plusieurs difficultés :

- En premier lieu, l'écosystème est particulièrement complexe ; il intègre des agences environnementales, des centres de recherche, des ministères, des collectivités locales ou régionales, des entreprises publiques et/ou privées, des ONG, etc., avec des modes de coordination de ces différents acteurs restant à définir ;
- En second lieu, en matière d'environnement, la notion même de système d'information et de « services climatiques », qui sont censés les utiliser est, à ce jour, extrêmement floue et reste largement à concevoir. Les schémas de principes existants, tels le Global Framework for Climate Services (GFCS[3]) qui fait référence en la matière, sont très généraux. Ils se limitent à proposer la mise à disposition d'informations via des plateformes

1 Le plus souvent traduit en français par « biens communs » ou simplement « communs ».

2 Notons qu'Ostrom s'intéresse à des « *small scale Common-Pool Ressources* », typiquement une nappe phréatique. Comme elle le précise : « *The Common-Pool Ressources is located within one country and the number of individuals affected varies from 50 to 15 000 persons who are heavily dependent on the Common-Pool Ressources for economic returns* » (1990, p. 26)

3 Voir : http://www.wmo.int/gfcs/

internet. L'usage réel de ces informations par les acteurs concernés reste à démontrer. Des questions scientifiques difficiles restent à traiter ; c'est le cas de la « descente d'échelle » des modèles climatiques globaux vers des situations locales spécifiques (une région, une ville, voire une installation technique particulière telle une station d'épuration).

Ceci, introduit plusieurs ruptures majeures pour le CNES.

- L'objet à concevoir : il ne s'agit plus en effet de concevoir un satellite qui va permettre de délivrer un (ou plusieurs) « service climatique », mais de penser la contribution des satellites – existants et/ou à venir – à des applications qui s'appuient sur des données spatiales (et pas uniquement). L'évolution majeure ici vient de la nécessité d'agréger différents types de données qui vont servir à l'élaboration de « produits » (carte, indicateur de vulnérabilité, bulletin de prévision, dispositif de prévention des risques, etc.) qui constitueront la base d'un service mais dont le contenu et la forme restent largement à définir.
- Sur la relation à l'écosystème : puisqu'il n'existe pas, en matière d'information environnementale et de services climatiques, de prescripteurs capables de spécifier le service attendu du spatial, l'enjeu est probablement pour le CNES de contribuer à l'émergence de nouveaux acteurs et de plateformes qui vont permettre d'agréger les données et servir de base au développement des services. C'est historiquement le rôle qu'il a joué dans le développement de l'océanographie opérationnelle via Mercator et CLS.
- Sur la conception du mandat : ceci ne peut plus se faire sur le mode traditionnel de la relation Maîtrise d'ouvrage/Maîtrise d'œuvre dans laquelle le mandant élabore un cahier des charges auquel le CNES répond. Et ceci pour une raison simple : le(s) mandant(s) n'a pas (encore), et c'est inévitable, de stratégie clairement définie en matière de services climatiques. L'enjeu est ici d'évoluer vers un processus de co-construction du mandat qui suppose à la fois d'organiser très en amont le dialogue entre les acteurs concernés, et de mettre en place des dispositifs permettant de piloter l'action chemin faisant. Ceci entraîne, par exemple dans l'évaluation des projets, la nécessité de distinguer entre l'évaluation a priori d'un potentiel de valeur, et le suivi de sa réalisation (Le Pellec-Dairon, 2013).

Au-delà de ces tendances de fond, notre recherche a mis en évidence les difficultés que rencontre l'utilisation des données produites par les systèmes d'observation de la Terre. Ainsi, dans un rapport de 2003 intitulé « *Accelerating the transition from Research to Operations* », le National Research

Council américain identifie deux « vallées de la mort[4] » qui pénalisent de manière récurrente les programmes spatiaux américains, civils et militaires. Ces deux vallées correspondent, dans le cas américain, à un découpage institutionnel entre la NASA et la NOAA. La première prend en charge le développement des satellites de recherche. La seconde assure le financement et la gestion des satellites opérationnels dont elle utilise les données pour ses prévisions[5] *(figure 1)*.

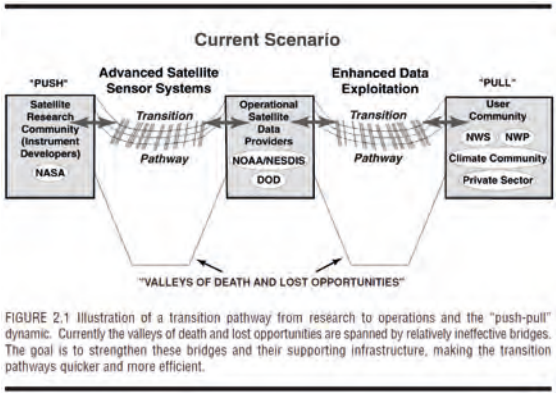


FIGURE 2.1 Illustration of a transition pathway from research to operations and the "push-pull" dynamic. Currently the valleys of death and lost opportunities are spanned by relatively ineffective bridges. The goal is to strengthen these bridges and their supporting infrastructure, making the transition pathways quicker and more efficient.

Figure 1 – Les vallées de la mort. source National Research Council.

Ainsi, schématiquement,

- La première « vallée » concerne le passage d'un satellite de recherche, qui vise à démontrer l'intérêt d'un instrument, à une série de satellites opérationnels qui vont garantir la pérennité des données collectées. Il s'agit là d'un problème tout à fait classique en R & D. Pour ne prendre qu'un exemple récent issu de l'histoire du CNES, un satellite comme SMOS, malgré la richesse des résultats obtenus, n'a pas pour l'instant de

4 Une précision s'impose ici. L'expression « vallée de la mort » est également utilisée au sein du CNES mais dans un sens différent. Elle désigne en effet la difficulté qu'il y a, pendant la conception d'un satellite, à passer les TRL moyens (entre 4 & 6). Nous ne l'utilisons pas dans ce sens ici. Les vallées de la mort identifiées par la NRC interviennent après le lancement des satellites.

5 Notons que le problème peut être plus compliqué. La figure montre en effet qu'il peut notamment exister des conflits, au sein de la NOAA, entre les équipes en charge des satellites et du premier traitement des données (NOAA/NESDIS), et celles en charge de la prévision météo proprement dite (NOAA/NWS).

successeur direct (même si le satellite américain SMAP produira des mesures proches).

- La seconde « vallée » est encore plus intéressante. Elle montre que parfois, malgré l'existence de satellites opérationnels garantissant la pérennité de la donnée, son adoption par les utilisateurs peut prendre un temps considérable voire ne jamais se produire. La NRC insiste ainsi sur la nécessité, rarement observée en pratique, de mettre en place des procédures, des équipes et des moyens dédiés à cette transition de la recherche aux opérations.[6]

C'est ce second point que nous voudrions développer maintenant avec un cas emblématique de la difficulté à franchir cette seconde « vallée de la mort » : l'utilisation des radiances produites par les sondeurs atmosphériques en prévision numérique du temps.

ESPACE ET MÉTÉO : UN LONG FLEUVE TRANQUILLE ?

La météorologie spatiale : une incontestable réussite

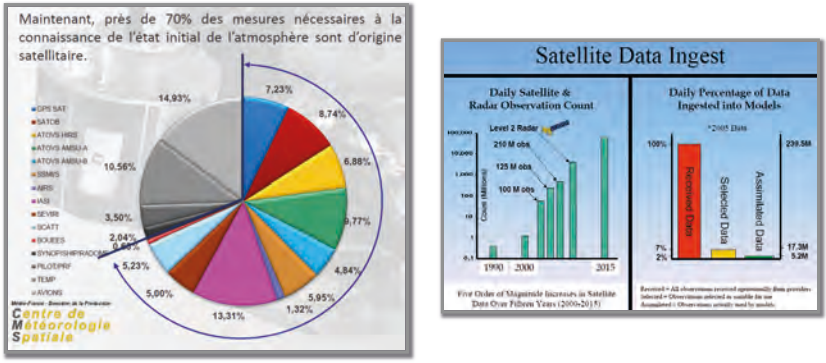
La valeur de la prévision météo est devenue évidente depuis la destruction d'une partie de la flotte française en Mer Noire le 14 novembre 1854. Cet événement fondateur toujours mentionné par les personnes rencontrées a conduit Urbain Le Verrier à mettre en place un réseau d'observation météorologique. La prévision météorologique n'a depuis cessé d'étendre ses domaines d'applications. Les militaires ont, comme c'est souvent le cas, joué le rôle de « *lead-user* ». La prévision météo utilisée pour lancer les opérations de débarquement en Normandie le 6 juin 1944 (sans l'aide de modèles numériques qui n'existaient pas à l'époque) reste ainsi un exemple historique de la valeur de la météo. Depuis, les usages de la prévision n'ont cessé de s'étendre et celle-ci est utilisée aussi bien par les autorités publiques pour anticiper les événements climatiques que par les particuliers ou les entreprises dont l'activité est influencée par le temps qu'il fait[7]. La météorologie joue ainsi un rôle très important pour de nombreux secteurs

6 Dans le rapport de 2000, les auteurs donnent des ordres de grandeur de l'effort nécessaire. Ils indiquent ainsi que cela suppose la mise en place d'une équipe (2 à 5 personnes 2 à 5 ans avant le lancement) dont c'est la tâche principale et dotée d'un budget significatif (de l'ordre de 10 % du coût de l'instrument) ; ces chiffres nous semblent sous-estimés.

7 A titre d'exemple d'entreprise spécialisée dans ce type de service voir http://www.climpact.com/

au premier rang desquels on trouve le transport aérien, l'énergie et l'agriculture. Ceci explique le développement d'un secteur commercial autour de la météorologie.

Le point qui nous intéresse ici est le rôle joué par les systèmes d'observation de la Terre dans la prévision météorologique. Force est de constater qu'ils sont aujourd'hui devenus totalement indispensables. On assiste ainsi depuis 1990 à une explosion du nombre de données satellites reçues par les centres météo. De nos jours, ces dernières représentent, dans le cas français, 70 % des données nécessaires à l'élaboration de la condition initiale de la prévision[8] *(figure 2)*.



Source : Derber, 2011 et CMS, 2013

Figure 2 – Utilisation des données satellites en prévision numérique du temps.

Par ailleurs, de nombreux travaux scientifiques démontrent l'apport des données satellite pour l'amélioration de la qualité des prévisions. Les expériences de *data denial*, qui consistent à supprimer les données satellite des modèles pour évaluer leur impact sur la qualité de la prévision sont convergentes. Elles montrent toutes que ces données jouent maintenant un

8 Ce qui ne signifie pas, comme nous le verrons, qu'elles expliquent 70 % de la qualité de la prévision. En météo un petit nombre de données peut avoir un impact considérable.

rôle fondamental dans la qualité de la prévision, leur suppression entraînant une dégradation importante de la prévision dans les deux hémisphères et ce quel que soit l'horizon temporel considéré.
Ces études sont d'ailleurs utilisées par les agences en charge de la gestion des satellites de météorologie pour justifier le financement des futurs satellites. Ainsi pour EUMETSAT, si l'on se réfère au cas de MetOp NG (qui devrait succéder à MetOp à l'horizon 2020) le raisonnement[9] consiste à appliquer à une estimation de la valeur globale de la météorologie pour les différents pays de l'Union européenne, la part de l'amélioration de la prévision attribuable aux données satellites (8 % dans le cas de MetOp NG[10]), puis à l'actualiser sur la durée de vie du satellite (20 ans). On obtient alors l'estimation suivante *(figure 3)* qui montre la valeur des satellites en orbite polaire puisque « *When these highly conservative annual benefit estimates are contrasted with the estimated cost of the EPS-SG Programme in the order of €3.4 billion (e.c. 2012), the minimum benefit to cost ratio is over 5 and the likely ratio exceeds 20, with the understanding that these ratios would increase by a factor of 3, if a 25 % apportionment was assumed instead of the worst case 8 %* » (EUMETSAT, 2014, p. 32).

BENEFIT AREA	MINIMUM	LIKELY
Protection of Property and Infrastructure	€1.3 billion/year	€5.5 billion/year
Added Value to the European Economy	€10 billion/year	€41 billion/year
Private Use by European Citizens	€4 billion/year	€15 billion/year
TOTAL (rounded)	**€15 billion/year**	**€61 billion/year**

Figure 3 – Estimation de la valeur de MetOp NG (EUMETSAT, 2014, p. 25).

9 Nous nous référons à l'étude EUMETSAT, « EPS/Metop Second-Generation : cost benefit analysis », (january 2014) disponible sur http://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/PSTG-3_Doc_11-04_MetOP-SG.pdf

10 Les auteurs retiennent volontairement une estimation prudente.

La météorologie constitue une réussite exemplaire pour le spatial. Les satellites sont des outils incontournables du Global Observing System de l'organisation météorologique mondiale, et ceci explique la pérennité des satellites opérationnels gérés, principalement, par la NOAA et l'ESA.

Et pourtant… un conflit entre la NASA et la NOAA autour des sondeurs atmosphériques

Reste qu'il n'en a pas toujours été ainsi et que ce succès masque le travail accompli pour en arriver là, la «*longue lutte pour réussir à utiliser efficacement les données disponibles*» pour reprendre les termes utilisés par le Directeur de l'ECMWF en ouverture du séminaire consacré à la question en septembre 2014. Notre recherche part ainsi d'un étonnement. Les diverses présentations auxquelles nous avons assisté, – Master de Emilie Gameyro & François Wyss (2010) ou encore la thèse de Marie Le Pellec-Dairon (2013)- donnaient à penser que l'outil satellite s'était imposé sans encombre aux acteurs de la météorologie. Ceci explique notre grande surprise, au printemps 2014, lors de la lecture du livre d'E. Conway, *Atmospheric Science at Nasa. A History* (The John Hopkins University Press, 2008). L'auteur y démontre qu'il existe aux États-Unis[11], à la fin des années 70, des débats virulents quant à la valeur des données satellite pour la prévision. Il ressort ainsi de la Global Weather Experiment (1979) conduite dans le cadre du Global Atmospheric Research Program (GARP), au sein duquel la NASA joue un rôle important, que :

1. les améliorations de la prévision sont principalement liées à l'amélioration des modèles de prévision et non aux données satellitaires ;
2. dans certains cas, ces dernières ont même tendance à dégrader les prévisions.

Ces constats sont partiellement liés aux limites intrinsèques des instruments embarqués à l'époque, mais également aux caractéristiques des données spatiales, qui diffèrent par nature (large maille, moindre précision…) des données utilisées par les modèles numériques de prévision (mesures in situ, radiosondes portées par des ballons). Toujours est-il que cette situation conduit à un conflit important entre la NASA d'une part, et la NOAA de l'autre. Conway mérite ici d'être cité longuement :

«Shelby Tilford, who became head of NASA's Upper Atmosphere Research Program in 1977, and later head of its overall Earth Science Program, recalls that the conflict had been over the relationship between instrument develop-

11 Qui, jusqu'au lancement des MeteoSat en 1978, détiennent le monopole de ces techniques.

pers and model developpers. Within NOAA, the National Environmental Satellite Data and Instrumental System (NESDIS) designed the instruments and operated the satellites while the National Weather Service (NWS) developed models. The conflict had come to a point when NOAA/NESDIS had sent over to NASA requirements for a next-generation sensor and the model developers at the NWS had refused to verify them. Indeed, they took a position of rejecting the value of satellite data entirely[12]*. Because the satellite data did not produce better forecasts than the radiosondes, the NWS only employed the satellite data from the southern hemisphere and used radiosonde data in the northern hemisphere. Tilford saw little sense in continuing to spend money on a program to develop sensors whose data would not be used. So NASA and NOAA leaders agree to end the Operational Satellite Improvement Program*[13] *in 1982 ».*

Les conséquences de ces conflits sont majeures pour les satellites. En effet, ceci se traduit par « *a two decade long hiatus in new instruments for the polar orbiters* ». Autrement dit, entre la fin des années 70 et la fin des années 90, la conception des satellites météos américains est, pour ainsi dire, gelée[14]. Par ailleurs, les tentatives de la NASA et de la NOAA pour poursuivre, dans le cadre du programme de sciences atmosphériques, le développement de nouveaux outils de mesure utiles à la météo, seront stoppées par l'arrivée au pouvoir de Ronald Reagan et les coupes budgétaires qui s'ensuivront. Comme le précise Conway « *this left NOAA without the ability to finance even incremental improvements to the weather satellite series, and the instrument generation of 1978, with only minor updates, continued to fly through the end of the century* ».

Cet étonnement nous a conduit à nous replonger dans l'ouvrage de Paul Edward, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data and the Politics of Global Warming* (MIT Press, 2010), en particulier le chapitre 10 consacré à la prévision numérique du temps qui rejoint les travaux de Conway. Edwards y explique que l'amélioration de la performance des prévisions, avec une contribution essentielle des données spatiales n'apparait réellement que

12 Nous soulignons.

13 Dont le rôle était à la fois d'améliorer la performance des satellites et de faciliter la transition entre recherche et opérations.

14 Mais ils continuent à exister, probablement en partie parce que d'autres chercheurs, avec d'autres modèles de prévisions (ceux de la NASA en l'occurrence) montrent quelques impacts positifs des données spatiales, en particulier sur les zones sans mesures in situ de l'hémisphère sud.

vers le milieu des années quatre-vingt-dix grâce à l'amélioration des performances des satellites en matière de sondage atmosphérique, à l'évolution de la structure des modèles de prévisions (qui s'éloignent d'une structure de données copiant celle des ballons-sondes) et à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. L'ouvrage d'Edwards pointe également des évolutions des modèles, « *from gridpoint to spectral techniques* », qui nous semblent alors totalement mystérieuses mais attisent notre curiosité.
Conway et Edwards remettaient en cause nos croyances sur les liens entre météo et données spatiales. Si la valeur de la météo n'était plus questionnée, celle de la donnée spatiale pour la météo semblait quant à elle relever d'une histoire complexe. Autrement dit, même dans ce cas emblématique d'un succès du spatial, le processus de réalisation de la valeur s'avérait a priori (très) long et (très) compliqué. Ces travaux soulignaient, notamment ceux d'Edwards, la difficulté pour une innovation de s'insérer dans un écosystème préexistant ; cela suppose en effet de s'adapter ou de faire évoluer des pratiques inscrites dans des dispositifs techniques et organisationnels lourds. C'était la situation des données satellites face aux modèles numériques de prévision qui en 1970 s'appuyaient déjà sur vingt-cinq années de recherche. Cet article résume nos investigations sur *l'intégration des données de radiances issues des sondeurs atmosphériques dans les modèles de prévision numérique du temps* (PNT). Cette intégration a nécessité une innovation de rupture dans les méthodes d'assimilation de données, avec un passage de méthodes dites d'interpolation optimale – qui se sont révélées incapables d'intégrer correctement les radiances, vers des méthodes dites d'assimilation variationnelles issues des théories mathématiques du contrôle optimal[15]. Un bref détour par la prévision numérique du temps est nécessaire pour poser le problème.

Comprendre le contexte d'usage : une brève introduction à la prévision numérique temps (PNT)

Le développement des techniques de PNT constitue une innovation de rupture en matière de météorologie. Cette histoire est maintenant bien documentée. Elle montre le basculement d'une science très empirique jusqu'à la seconde guerre mondiale vers des pratiques dans lesquelles la modélisation joue un rôle essentiel. Ce développement est étroitement lié, après

15 Ce travail se fonde sur trois types de sources : les travaux en histoire et sociologie des sciences sur la question, la littérature scientifique en météorologie et des entretiens avec les principaux acteurs de ce basculement. Pour plus de détails, voir Lenfle, 2015.

1945, au développement des ordinateurs. John von Neumann la considère comme l'un des domaines privilégiés d'application de l'informatique naissante. L'Electronic Computer Project qu'il lance à Princeton en 1946 comprend ainsi un « Meteorological Research Project » qu'il confie à Jules Charney. Celui-ci jouera un rôle fondamental dans l'histoire de la PNT. Ses travaux fondateurs aboutissent, huit ans plus tard, aux premiers modèles de prévision opérationnelle, en Suède en septembre 1954 puis aux États-Unis en mai 1955. Les performances de ces modèles n'ont cessé de s'améliorer depuis et ils fournissent aujourd'hui une prévision quasiment parfaite à trois jours et à 500 hecto-Pascal *(figure 4)*. Ils sont devenus des outils incontournables pour les services météorologiques du monde entier.

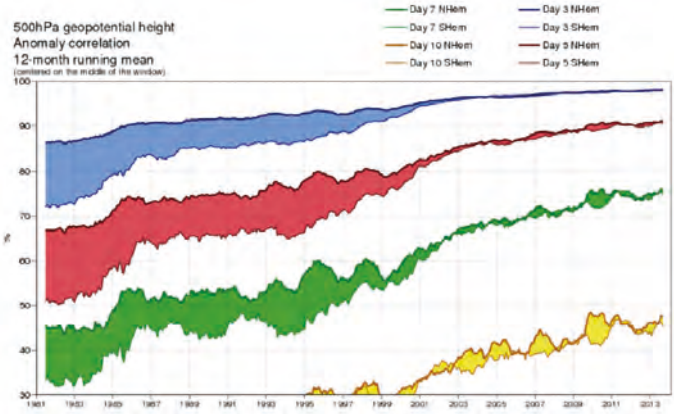


Figure 4 – L'amélioration des performances de la PNT

Fondamentalement, ces modèles fonctionnent en s'appuyant sur les lois physiques qui gouvernent le fonctionnement de l'atmosphère qu'ils représentent à partir d'une grille en trois dimensions *(figure 5)*. Un certain nombre de variables fondamentales (température, humidité, pression, vent…) sont nécessaires afin de prédire l'évolution du temps sur une période allant de quelques heures à quinze jours (prévision dites à moyen terme).

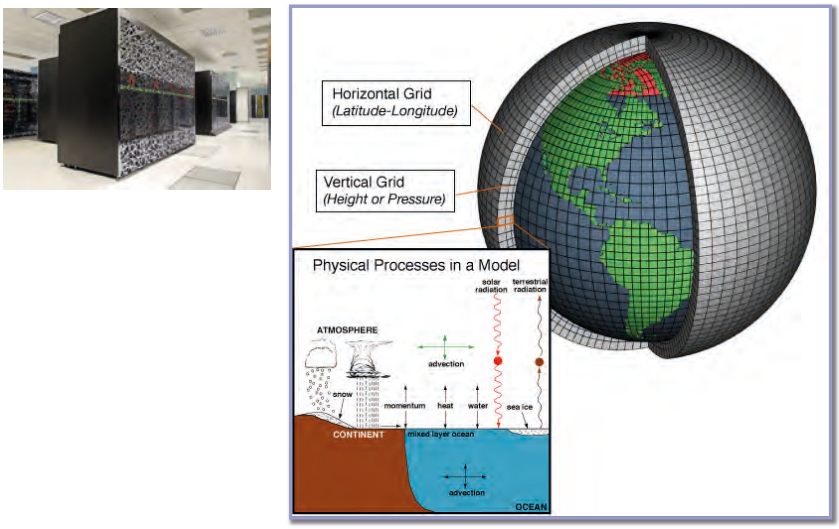


Figure 5 – Modèle de PNT
Source : Wikipedia, ECMWF, Charney & al (1950)

Leur grande complexité fait qu'ils requièrent pour fonctionner de gros volumes de données, de l'ordre d'un milliard aujourd'hui pour le modèle de l'ECMWF[16]. Et ceci constitue une rupture dans la pratique des météorologues. Comme l'explique Paul Edwards : « *Computer models demanded a degree of standardization never previously needed in meteorology. NWP required that values be entered at every gridpoint, both horizontal and vertical, even where no observations existed. Missing gridpoint values had to be interpolated from observations, or even (if necessary) filled in with climatological norms* ».
Pour comprendre le problème qui nous préoccupe ici, précisons qu'un système de prévision numérique du temps comporte deux étapes : l'assimilation de données pour déterminer les conditions initiales, et la prévision proprement dite *(figure 6)*.

16 European Center for Medium Range Weather Forecast ou Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen-Terme (CEPMMT), situé à Reading en Grande-Bretagne qui est le leader mondial en matière de prévision météo à moyen terme. Pour une histoire de l'ECMWF voir Woods (2006).

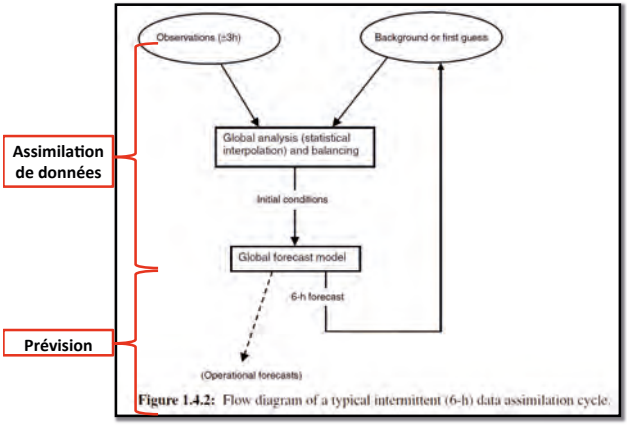


Figure 6 – Les étapes de la prévision (Kalnay, 2003)

E. Kalnay, explique que la qualité d'une prévision est directement dépendante de la détermination des conditions initiales[17], celles-ci pouvant modifier radicalement le résultat final[18]. Olivier Talagrand qui, a joué un rôle essentiel dans cette histoire, définit l'assimilation comme «*using all the available information to produce the most possible accurate description of the state of the flow, together with the uncertainty resulting from uncertainties on the various sources of information*». En météorologie, ces sources d'information sont très variées : ballons-sondes, stations sol, avions, bateaux, satellites, etc. Chacune de ces sources produit des informations avec des caractéristiques spécifiques. Talagrand pointe ici trois difficultés :

- Déterminer les conditions initiales sur lesquelles vont se baser les prévisions est un problème complexe. Les besoins en données du modèle de prévision dépassent de loin le nombre d'observations disponibles (dans un rapport de 1 à 100 environ). La méthode consiste à combiner à l'aide de techniques mathématiques les observations disponibles et, pour les zones sans observation, la dernière prévision disponible (appelée ébauche ou first-guess ou background).

17 «*NWP is an initial/boundary value problem*», Kalnay, 2003.

18 Les travaux sur la théorie du chaos ont leurs origines en météorologie avec notamment E. Lorenz qui posa dans une conférence de 1971 la célèbre question : «*Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas ?*»

- La nécessité pour la prévision d'être prête à l'heure. Par conséquent, le temps de calcul disponible pour réaliser l'assimilation et la prévision est extrêmement réduit (entre deux et trois heures) compte tenu de la complexité des calculs. Comme l'explique Philippe Courtier « *les contraintes de délais sont très fortes. Les données de sondage les plus intéressantes sont réceptionnées à 0 h 00. La transmission prend du temps. On a toutes les données vers 2 h 30* ; *il faut que la prévision soit finie vers 4 h 30 du matin pour être prêt à la conférence de 6 heures entre le chef prévisionniste et les sept zones régionales afin d'établir la carte de vigilance. Et ces délais ne sont pas négociables.* » C'est une contrainte majeure pour les météorologistes, elle explique le recours aux supercalculateurs les plus performants ;
- L'extrême complexité des phénomènes physiques sous-jacents qui sont par nature chaotiques (« Non-trivial, actually chaotic, underlying dynamics »)

Les méthodes d'assimilation sont donc au cœur de la question qui nous intéresse. En météorologie, toute nouvelle donnée doit en effet passer à la moulinette de ces méthodes d'assimilation et démontrer son apport à la prévision. C'est le cas des données satellites. Or, celles-ci ont fondamentalement remis en cause les méthodes d'assimilation dominantes dans les années quatre-vingts, quatre-vingt-dix, méthodes dites d'interpolation optimale.

LE DOMINANT DESIGN DE L'ASSIMILATION DANS LES ANNÉES QUATRE-VINGTS ET SES LIMITES POUR LES DONNÉES SPATIALES

Afin de comprendre les problèmes posés par l'assimilation des radiances en prévision numérique du temps, rappelons le fonctionnement d'un sondeur atmosphérique et les caractéristiques des mesures qu'il effectue.

Sondeurs atmosphériques, radiance et fonction de transfert radiatif.
Le premier sondeur atmosphérique, SIRS-A[19], lancé sur le satellite de recherche Nimbus-3[20] en 1969 a ouvert la voie à une lignée d'instruments *(figure 7)* qui a connu une évolution irrégulière en trois phases :

- L'exploration, qui s'ouvre avec le lancement de SIRS-A et s'achève très

19 Pour une description technique voir : http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1969-037A-04

20 Sur Nimbus 3 voir : http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1969-037A

probablement en 1978 avec les premiers sondages considérés comme « opérationnels » par les météorologistes (Courtier, 1997)

- Une période de crise correspondant au conflit entre la NASA et la NOAA qui conduit à un « gel » de la configuration et des performances des instruments pendant 20 ans. Cette crise est directement liée à la difficulté à utiliser les données.
- La reprise de l'innovation au début des années 2000 qui voit une nouvelle rupture technique avec le lancement de l'instrument AIRS en 2002 sur le satellite Aqua de la NASA (passage de 15 à 2378 canaux) puis IASI en 2006 sur MetOp, satellite de l'Agence spatiale européenne (8461 canaux)

TABLE B.1 Chronology of Early Satellite Sounders Flown on NASA and NOAA Satellites

Instrument	Satellite	Primary Period of Operation
SIRS-A	Nimbus-3	1969-1971
SIRS-B	Nimbus-4	1970-1972
ITPR, NEMS, SCR	Nimbus-5	1972-1975
VTPR	ITOS series	1972-1979
HIRS, SCAMS, PMR	Nimbus-6	1975-1979
HIRS-2, MSU, PMR	NOAA series	1978-1998
VAS	GOES series	1980-1996
HIRS-3, AMSU	NOAA series	1998-present

NOTE: The acronyms are spelled out in Appendix E.
SOURCE: Kalnay et al. (1996).

Figure 7 – Les sondeurs atmosphériques (1969 – 1998)

La difficulté d'intégration des données fournies par ces sondeurs tient très directement à la nature de la mesure qu'ils effectuent. Pour fonctionner, un modèle de prévision numérique du temps s'appuie sur des paramètres fondamentaux, dont la température, sur laquelle ce rapport se concentre. Traditionnellement, les météorologistes mesurent la température de l'atmosphère à l'aide de thermomètres accrochés à des ballons-sondes qui produisent, à heure fixe et à des points donnés, des profils verticaux de température précis, entre le sol et trente kilomètres d'altitude. Ces profils sont ensuite utilisés par les modèles pour prédire le temps qu'il va faire. Or, et c'est là toute la difficulté, un satellite en orbite polaire ne peut, à la différence d'un thermomètre, mesurer directement la température. Il mesure, deux fois par jour et sur l'ensemble du globe, un rayonnement dont on déduit des paramètres météorologiques *(figure 8)*.

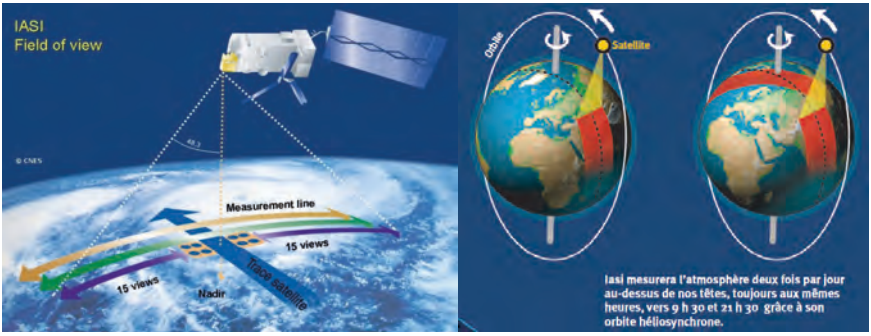


Figure 8 – Fonctionnement d'un satellite en orbite polaire (MetOp/IASI).

Suivons sur ce point Michel Avignon : *« On conçoit bien que la température que peut mesurer le satellite à plusieurs centaines de kilomètres de distance n'a qu'un lointain rapport avec la température mesurée par un thermomètre. Le thermomètre mesure la dilatation d'un fluide dans une colonne de verre, qui, par contact, se met en équilibre thermique avec le milieu qui l'entoure directement et dont on veut mesurer la « température ». Le satellite, lui, sans contact matériel avec l'atmosphère, mesure l'énergie émise par les couches de gaz qui composent l'atmosphère, selon les lois du rayonnement thermique et la capacité d'absorption du rayonnement par les gaz à chaque longueur d'onde d'observation : par l'intermédiaire des lois du rayonnement thermique, des propriétés quantiques des gaz composant l'atmosphère, enfin via le calcul du transfert radiatif, on remontera de l'énergie mesurée au niveau du satellite à une « température » des couches atmosphériques. Cette « température » semble plutôt un moyen d'interpréter la mesure, qu'une entité objective indépendante de l'instrument accompagné de ses modèles interprétatifs. » (in Dubois & al, 2014, p. 243-244).*
En d'autres termes, la radiance mesurée par le satellite est une *observation* dont on déduit des paramètres pertinents pour les modèles de prévision numérique du temps. Ainsi, si x est le vecteur de paramètres météo qui nous intéressent et si y est l'observation alors $y = K(x, z)$ où z représente d'autres paramètres dont dépendent les observations, et K est la relation physique en x, z et y. Dans le cas des radiances *(figure 9)* :

- y sont les observations de radiances mesurées par le satellite ;
- x des profils de températures, d'humidité et d'ozone dont le modèle a besoin ;
- K est l'équation de transfert radiatif (et il y a déjà énormément de physique à ce niveau-là) ;

- *z* des paramètres inconnus comme l'émissivité de surface (dépendante du type de sol, de son humidité, etc.), des profils de CO2, de méthane, etc.

Les prévisionnistes se sont donc trouvés confrontés à une difficulté majeure : comment assimiler ces nouvelles données dans les modèles de prévision numérique du temps ? Le problème est redoutable car mathématiquement la fonction K n'est pas inversible. On ne peut pas facilement connaissant *y* retrouver *x*[21].

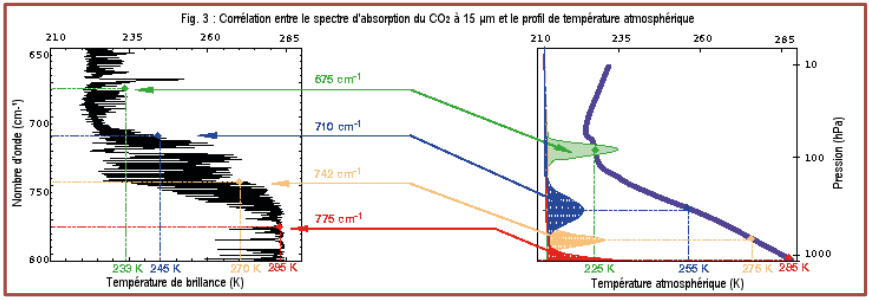


Figure 9 – De la radiance aux profils de température.

La fonction de transfert radiatif *(figure 10)* qui permet de passer de la mesure du satellite (à gauche dans la *figure 9*) au profil de température (à droite dans la *figure 9*), peut s'écrire sous la forme :

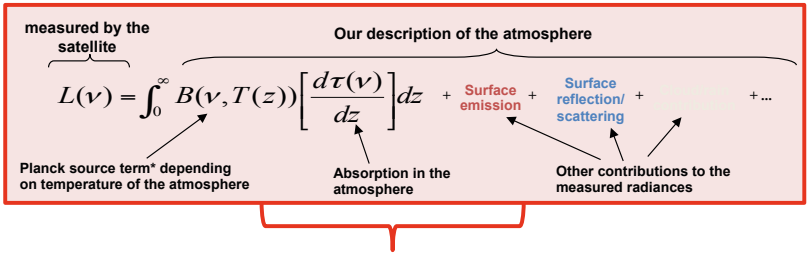


Figure 10 – La fonction de transfert radiatif.
Source : document IASI et présentation ECMWF.

21 Comme l'explique Jean Pailleux : « *On sait très bien recalculer le rayonnement quand on a la température et l'humidité, mais quand on a quelques valeurs de rayonnement on n'arrive pas à restituer x & z sans observations auxiliaires* ».

L'approche « satellite-to-model » (Hollingsworth, 1990) ou comment reproduire des profils de température compatibles avec les modèles.

La première approche utilisée par les météorologistes a consisté à s'inscrire dans le cadre des méthodes existantes et donc d'essayer de produire, à partir des données satellites, des profils de températures similaires à ceux utilisés par les modèles. Cette approche est parfaitement résumée par le Directeur de la prévision de la NOAA quand il affirme, en 1969, « *If you can make them look like radiosonde data we can use them* », Anthony Hollingsworth (1990) caractérise cette approche comme « *satellite-to-model* », autrement dit on va forcer les données à s'insérer dans les contraintes imposées par le modèle.

C'est alors que les problèmes apparaissent. Pendant une décennie les travaux scientifiques sur la contribution des sondages atmosphériques à la prévision météo montrent que leur impact est nul voire négatif sur la qualité de la prévision dans l'hémisphère nord qui regroupe 90 % de la population du globe, la majorité des terres émergées et… les financeurs (les États-Unis à l'époque). Ainsi, par exemple, un article de Tracton & al. (1980) utilisant les modèles opérationnels de la NOAA et des données de 1975-76 conclut que « *overall the impact of remote soundings in the NH*[22] *was negligible* ». Le problème est que, dix ans plus tard, en 1991, on trouve encore des articles démontrant que, en raison notamment de la sophistication des modèles, l'impact des données satellite est au mieux nul, au pire négatif (Andersson & al, 1991). Philippe Courtier résume bien le sentiment général de l'époque : « *En 1984, l'ECMWF a un impact négatif dans l'hémisphère nord, on sait qu'incontestablement les satellites représentent l'avenir de l'observation* [en raison de la couverture qu'ils offrent] *mais on ne sait pas les utiliser et c'est terrible…* ». Là gît en effet le paradoxe fondamental de cette période : des satellites qui volent, qui fournissent une couverture sur l'ensemble du globe inaccessible à tout autre instrument *(figure 11)*, mais dont les données, telles qu'elles sont utilisées à l'époque, n'améliorent pas la prévision. À partir de la littérature sur la question et de nos entretiens, nous identifions deux problèmes à l'origine de cette situation : la mauvaise qualité des sondages produits par la NOAA et les méthodes d'assimilation utilisées à l'époque, dites d'interpolation optimale. Nous les traitons successivement.

22 North Hemisphere.

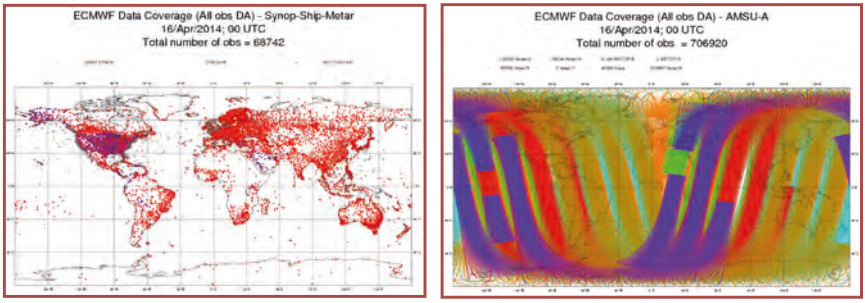


Figure 11 – Couverture des mesures in situ vs. satellites

Premier problème : la mauvaise qualité des sondages fournis par la NOAA (SATEM)

La nouveauté de la mesure satellite oblige les météorologues à utiliser des méthodes d'extraction (*retrievals*) pour produire des sondages similaires aux radiosondes. Or, ces méthodes aboutissent à une dégradation considérable de l'information. Suivons ici Jean Pailleux, qui a joué un rôle central dans l'évolution des méthodes d'assimilation d'abord à Météo-France, où il a créé le département d'assimilation de données dans les années 70, puis à l'ECMWF où il a été l'un des piliers du projet IFS/ARPEGE.[23]

«*De la fin des années 60 jusqu'à 1978, les États-Unis étaient les seuls à mettre en orbite des instruments météo. [...] Ils produisaient une masse de données tellement grosse que 90 % des données restaient à Washington au centre NOAA NESDIS. Du fait des contraintes de télécommunication, les États-Unis [...] n'*échantillonnaient *qu'une petite quantité de données. Le traitement consistait à produire des pseudo-sondages. Cela, ressemblait à ce que peut produire une radiosonde [...] mais l'information météo de base était dégradée. [...], si on en faisait une analyse en composante principale, c'était l'équivalent de deux ou trois points sur la verticale en température. Cela indiquait simplement si la stratosphère* était *plus chaude que la troposphère, s'il y avait un gradient de température normal. C'était une information très pauvre [...] par rapport aux ballons et par rapport aux besoins des modèles de prévision numérique qui avaient déjà 10, 15, 20 niveaux. [...] Cela*

23 Voir page suivante.

ne correspondait qu'à quelques pour cent d'information par rapport aux besoins réels des modèles. [...] L'information réelle *de ce sondage contenait un peu d'informations du sondeur lui-même et beaucoup d'informations venant d'un fichier climatologique ou d'un modèle de prévision américain. Ce n'était pas une information satellite pure (..) elle* était contaminée par de l'information auxiliaire. »...L'assimilation de cette information dégradée dans des modèles de plus en plus perfectionnés soit n'améliore pas la prévision, soit la dégrade (Andersson & al, 1991).

✺ L'ASSIMILATION VARIATIONNELLE COMME CHANGEMENT DE DOMINANT DESIGN EN ASSIMILATION DE DONNÉES

Le chapitre suivant détaille l'analyse du projet IFS/ARPEGE qui a abouti à l'invention d'une nouvelle méthode d'assimilation des données satellite, l'assimilation variationnelle. Ce basculement vers les méthodes d'assimilation variationnelle a supposé :

1. une rupture conceptuelle, les méthodes d'interpolation optimale traditionnellement utilisées ont été remplacées par des méthodes mathématiques dites de contrôle optimal. Cette rupture est le fruit de la rencontre entre un météorologue, Olivier Talagrand, et un mathématicien, François-Xavier Le Diment (Talagrand et Le Dimet, 1986) ;
2. le lancement par l'ECMWF et Météo-France d'un projet commun, IFS/ARPEGE. C'est dans le cadre de ce projet que les méthodes nécessaires à la mise en œuvre de l'assimilation variationnelle ont été conçues, notamment les algorithmes permettant de réduire les coûts de calcul de la méthode. Philippe Courtier, ancien doctorant d'Olivier Talagrand, a été le moteur de ce projet en faisant le lien entre la météo, le contrôle optimal et la programmation informatique. Dix années de travail ont ainsi été nécessaires pour passer du concept proposé par Le Dimet et Talagrand, à la mise en œuvre opérationnelle de la méthode à l'ECMWF en 1996 (pour ce qu'on appelle le 3D-VAR).

Dans le cadre de la réflexion sur les conditions nécessaires à un usage opérationnel des données satellite, nous souhaitons ici privilégier la réflexion sur les enseignements à en tirer en termes de management de projet et sur le rôle spécifique du CNES.
L'assimilation variationnelle qui s'est imposée comme nouveau cadre, constitue une rupture à tous les niveaux du processus d'assimilation. Nous proposons de relire le projet IFS/ARPEGE à cette aune puis de revenir sur

la seconde « vallée de la mort » identifiée au départ et de terminer sur les implications pour les missions du CNES.

L'assimilation variationnelle vue comme changement de dominant design

Les données spatiales ont remis en cause les pratiques dominantes d'assimilation des données dans les modèles de prévision numérique du temps, autrement dit, le dominant design de l'interpolation optimale n'était pas adapté à leurs caractéristiques de données asynoptiques, indirectes et reliées par des fonctions non-linéaires aux variables du modèle. Ceci expliquait les difficultés rencontrées par les météorologues pour les assimiler et leur absence d'impact sur la prévision numérique dans les années 80-90. L'histoire de l'émergence puis de la mise en œuvre des méthodes variationnelles permet de spécifier le nouveau dominant design, entendu ici comme un ensemble stabilisé d'outils, d'acteurs et de pratiques qui prévaut depuis maintenant vingt ans dans les grands centres de météorologie mondiaux, au premier rang desquels l'ECMWF et Météo-France *(figure 12)*.

	DD de l'Interpolation optimale	**DD variationnel**
Type d'instrument	In-situ (bouées, stations sols, ballons-sondes, etc.)	Tous : in situ et télédétection (dont les satellites)
Nature de la mesure	Conventionnelle : directe et synoptique	Toutes dont indirectes et asynoptiques
Méthodes d'assimilation	Interpolation optimale	Assimilation variationnelle 3D/4D
Base théorique	Estimation statistique	Contrôle optimal

Figure 12 – De l'interpolation optimale à l'assimilation variationnelle : un changement de dominant design

Le changement d'instrument et, donc de mesures, produit des effets en cascade puisque l'assimilation de ces nouvelles données a engendré l'émergence de méthodes d'assimilation innovantes (variationnelles) fondées sur des bases théoriques totalement différentes (le contrôle optimal) et nécessitant une augmentation de la puissance de calcul. Les pratiques ont changé radicalement, ce que résume parfaitement la formulation d'A. Hollingsworth quand il parle d'un basculement d'une approche « satellite-to-model » vers

une approche « model-to-satellite »[24]. Dans cette histoire, il est ainsi possible d'identifier plus précisément six ruptures :

- sur les données : mesures par satellites versus mesures in situ ;
- sur les principes de l'assimilation de données : basculement vers les méthodes variationnelles ;
- sur la possibilité de mettre en œuvre ces méthodes grâce au contrôle optimal : en particulier la technique des équations adjointes qui va permettre de calculer le gradient du modèle et donc de minimiser la fonction de coût ;
- sur la mise en œuvre opérationnelle : l'invention d'un algorithme dit « incrémental » permet de diviser par dix les temps de calcul et en conséquence, de satisfaire les contraintes opérationnelles de la prévision météo ;
- sur la façon de coder le modèle lui-même pour disposer de son adjoint dans des systèmes de grande dimension (codage dit ligne à ligne) ;
- sur les supercalculateurs dont l'augmentation de la puissance autorise la mise en œuvre de l'assimilation variationnelle (« Il y a une convergence entre la rupture conceptuelle, *l'adjoint appliqué à la météo, et la puissance de calcul* »). À cet égard, la décision de l'ECMWF en 1996 de ne pas migrer l'interpolation optimale vers le nouveau supercalculateur du centre marque le point de non-retour du projet à partir duquel le basculement vers l'analyse variationnelle devient irréversible.

On comprend mieux dès lors les caractéristiques du projet IFS/ARPEGE, en particulier sa durée (et notamment le report de 3 ans de la date de fin en 1991) et l'importance des ressources nécessaires pour le mener à bien. Le point le plus frappant ici est l'imbrication totale entre la science et la mise en œuvre. À la différence des hypothèses traditionnelles du management de projet, il est difficile de distinguer une phase amont de « recherche » puis une phase de développement. Le projet mêle inextricablement les deux. Il n'est pour s'en convaincre que de regarder le nombre de publications dans les meilleures revues scientifiques qui ont lieu pendant le projet *(figure 14)*. Autrement dit, pour reprendre et critiquer les termes fréquemment utilisés dans le spatial, « l'aval » ne saurait se limiter au simple développement d'applications à partir des dispositifs techniques conçus par les agences spa-

24 Pour Philippe Courtier : « *Oui, on peut parler de rupture. Encore une fois il y a des continuités, on ne repart pas de zéro. Mais il y a un avant et un après l'analyse variationnelle dans la facilité à utiliser les observations nouvelles et le nombre d'observation qu'on peut utiliser* ».

tiales. Comme nous venons de le voir il n'est pas moins « scientifique » que l'amont et suppose, lui aussi, des ruptures fondamentales. La science et la recherche sont donc présentes à toutes les étapes du processus de conception[25]. La méthode incrémentale, par exemple, est publiée par Courtier et al. en 1994, deux années seulement avant la mise en œuvre opérationnelle de l'assimilation variationnelle et alors que le projet est lancé depuis 1987. Cette imbrication totale explique les dix années de travail nécessaires qui, pour Olivier Talagrand, sont relativement incompressibles : « *A posteriori on se dit qu'on aurait pu comprimer un peu ici et là, mais ça n'aurait été que marginal. Je crois que ça a été très bien mené.* »

En ce qui concerne, les compétences nécessaires à l'utilisation des données, on distingue trois domaines différents, qui correspondent au modèle d'écosystème des *data science* proposé par Balazs Kègl (Center for Data Science, Université Paris-Sud et CNRS. Voir *figure 13*[26]) :

- les compétences fondamentales sur les méthodes d'analyse de données ;
- les compétences métiers, en l'occurrence ici la météorologie ;
- la maîtrise des outils nécessaires à cette analyse c'est-à-dire les modèles météorologiques et les programmes informatiques qui y sont associés.

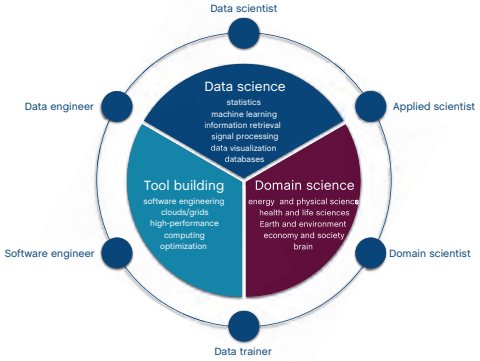


Figure 13
Source : http://www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/presentation_balazs_kegl.pdf

25 Notons que ce point n'est pas nouveau. Il a notamment été mis en évidence dans l'article classique de Kline & Rosenberg (1986). Dans ce qu'ils appellent le « *chain-linked model* », qui constitue une critique virulente du modèle linéaire, la « Science » ne se situe pas « avant », elle peut intervenir à toutes les étapes du processus de conception.

26 Voir https ://medium. com/@balazskegl/the-data-science-ecosystem-678459ba6013 ou encore sa présentation lors du SIG Design Theory, École des Mines de Paris, janvier 2015.

Date	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
			Projet IFS / ARPEGE à l'ECMWF et Météo France									
Evénement important	Application du contrôle optimal à l'AVAR	VAR modèle 1 couche. Début du recodage du modèle de prévision	Lancement IFS/ARPEGE. Recodage du modèle de prévision	Recodage du modèle de prévision	VAR modèle 3D. Colloque de Clermont-Ferrand sur l'assimilation	4DVAR modèle 3D. Décalage de la date de fin estimée d'IFS/ARPEGE	4DVAR instabilité barocline	VAR avec obs conventionnelles dans modèle 3D. Comparaison 3D / 4DVAR	Utilisation radiances en 3D/4DVAR ; Méthode incrémentale; réglage de B	Poursuite de la préparation à la mise en œuvre opérationnelle	Basculement vers le 3DVAR à l'ECMWF	Basculement vers le 4DVAR à l'ECMWF et le 3D-VAR à MF
Référence	Le Dimet & Talagrand, 1986	Thèse Courtier; Courtier & Talagrand, 1987; Talagrand & Courtier, 1987			Courtier & Talagrand, 1990; Le Dimet & Talagrand (eds).	Thépaut & Courtier, 1991	Rabier & Courtier, 1992	Thepaut & al., 1993; Rabier & al., 1993	Andersson & al, 1994 : Courtier & al, 1994		Courtier & al, 1998; Rabier & al, 1998; Andersson & al., 1998	Rabier & al., 2000

Figure 14 – Chronologie simplifiée de l'assimilation des radiances en PNT à l'ECMWF.

Dans l'histoire de l'assimilation des radiances, ces trois domaines ont été réunis. En résumant schématiquement on peut identifier, filant ici la métaphore spatiale, trois « étages » dans la fusée qui conduit du concept à sa mise en œuvre :

1. **La rencontre** entre Le Dimet et Talagrand, concrétisée par le papier fondateur de 1986, permet de lever le verrou des méthodes variationnelles grâce au contrôle optimal.
2. **La thèse** de Philippe Courtier (1987) sous la direction de Talagrand, et les articles cosignés qui en découlent (Talagrand et Courtier 1987 & 1990) démontrent la faisabilité opérationnelle de la méthode sur des modèles simplifiés.
3. **Le projet IFS/ARPEGE** dont Philippe Courtier est considéré comme la locomotive déclenche la mise en œuvre opérationnelle de la méthode à l'ECMWF puis à Météo-France. Ce point est important car le lancement d'un projet montre l'engagement de l'organisation sur cette question et facilite la mobilisation des ressources nécessaires (humaines et financières). Ceci démontre la complexité de ce travail sur la donnée qui suppose une structuration spécifique.

On note le rôle fondamental d'Olivier Talagrand. Grâce à sa double compétence en mathématiques et en météorologie, il comprend l'intérêt pratique des méthodes proposées par Le Dimet puis, ensuite, suit la mise en œuvre via sa relation privilégiée avec Philippe Courtier et son rôle de directeur du Conseil scientifique de l'ECMWF. Enfin, Philippe Courtier (X78 – école de la météo) synthétisera en quelque sorte les trois compétences (contrôle optimal et analyse variationnelle, météo et programmation) ; de plus, grâce à sa maîtrise de la programmation, il occupera le rôle central dans le projet IFS/ARPEGE.

À propos de la « résistance des utilisateurs » et de « l'aval » : retour sur la seconde « vallée de la mort ».

Les analyses précédentes éclairent d'un jour nouveau la question de la transition entre la recherche et l'usage opérationnel, en particulier celle du franchissement de la seconde « vallée de la mort » qui sépare l'existence de satellites opérationnels de l'utilisation effective des données. Les travaux sur la question, qu'il s'agisse des rapports de la NRC (2000 & 2003) ou du travail de Krige, insistent tous sur la « *résistance des utilisateurs* » pour expliquer les difficultés de la transition. Le rapport de la NRC de 2003 suggère trois facteurs explicatifs à la difficulté d'utilisation des radiances :

« 1. Inadequate scientific research to determine an appropriate way of using

the observations[27]*. The discovery of how to use the radiance values rather than the retrieved profiles in numerical modeling took about 25 years.*
2. Resistance to change. A major potential user insisted that the data look like radiosonde data.
3. *Lack of a technology transition plan or process. The operational centers were not prepared to use the data when they first became available.* »

Ce rapport résume le processus que nous venons d'expliquer de la manière suivante.
« The reason why the satellite soundings had little impact on the forecast was that the satellite retrievals were treated as poor-quality radiosondes (i.e., point measurements) rather than as high-quality volume measurements (i.e., what the radiances represent). By assimilating the radiances rather than the retrievals, the proper spatial resolution of the data was necessarily represented in the model, thereby avoiding the prior aliasing of smaller-scale features with low spatial resolution data (i.e., the satellite soundings). It was not until the data user fully understood the characteristics of the satellite observations that ***a technique*** *was devised for the proper assimilation of these data in their analysis/forecast operation. »*[28] (p. 103-104, souligné ici par nous)

Cette analyse des difficultés du processus de transition et de l'utilisation des données spatiales nous semble extrêmement critiquable, en particulier l'insistance sur la « résistance au changement ». En effet, hormis le fait qu'il s'agit là d'un jugement de valeur sur des acteurs qui n'auraient pas bien compris à quel point l'idée est géniale, cette analyse renvoie à une conception très linéaire du processus dans lequel l'innovation serait d'abord mise au point avant d'être proposée à des utilisateurs plus ou moins « résistants ». On reconnaît ici l'influence du modèle dit « de diffusion » des innovations que les sociologues de l'innovation comme Bruno Latour ont si remarquablement critiqué : « *Après avoir inventé le « découvreur génial qui a des idées », le modèle de diffusion va maintenant inventer ce monstre symétrique : un milieu, une société qui n'acceptent ces idées qu'avec plus ou moins de difficulté. […] il invente des groupes qui lui résistent. […] La société n'y apparaît que comme un milieu où s'exercent diverses résistances au travers desquelles se déplacent des idées et des ma-*

27 Nous ne développerons pas ce point mais nous sommes quelque peu sceptique sur la qualification « d'inadéquate » pour la recherche. Il s'agit en effet d'un jugement qu'il est toujours facile d'émettre… a posteriori.

28 Nous soulignons.

chines.» Mais, une idée n'existe pas en général, «*elle doit être transformée, modifiée en fonction de l'endroit, de la personne… Adopter une innovation c'est l'adapter […]. Et cette adaptation résulte en général d'une élaboration collective fruit d'un intéressement de plus en plus large*». Parler de «résistance des utilisateurs» c'est ignorer cette contribution fondamentale à la compréhension du processus d'innovation et rester prisonnier d'un modèle dans lequel «l'aval» ou les «applications» viennent après la conception de l'objet technique. Celle-ci se faisant fondamentalement sans les utilisateurs qui ne peuvent par conséquent que «résister» ou «adhérer». À ce titre, les mots utilisés par la NRC méritent que l'on s'y attarde, en particulier le passage que nous avons souligné. «*A technique was devised*» désigne ici les méthodes d'assimilation variationnelles, qui ne sont d'ailleurs pas citées. «*A technique*» ne saurait en effet être quelque chose de très complexe. Or, le cas que nous venons d'analyser permet de montrer à quel point il s'agit au contraire d'un bouleversement majeur dans les méthodes d'analyse et leur mise en œuvre. L'histoire précédente montre que limiter l'ampleur de la tâche à une «*technique*» revient à sous-estimer la complexité des processus physiques, des modèles et des contraintes d'intégration dans un système opérationnel qui sont consubstantiels à l'utilisation des données spatiales. L'enjeu consiste à faire co-évoluer les données, les méthodes d'assimilation, les pratiques et l'infrastructure technique[29].

Notre recherche voudrait contribuer à la prise de conscience de la complexité de ce travail à accomplir sur «l'aval», sans lequel le risque est grand pour l'innovation de rester coincée au fond de la «vallée de la mort». Plutôt que de parler de «résistance des utilisateurs» ou même, d'utiliser un concept aussi vague que celui «d'aval» il serait plus judicieux de parler d'un ***processus de conception des usages de la donnée***, au même titre qu'existe un processus de conception de l'instrument.

«L'aval» a en effet une signification très floue, littéralement, le terme désigne «un stade ultérieur»[30], «ce qui vient après le point considéré, dans un processus»[31], et justifie qu'on ne s'en occupe pas puisque cela vient «après» ce dont on a la charge (en l'occurrence, la conception des satellites, plateforme et instrument scientifique). Cela revient à considérer implicitement que la donnée a de la valeur en tant que telle et que ce qui relève de son utilisation ne concerne

29 Le rapport NRC montre d'ailleurs lui aussi que dieu git dans les détails. Page 30, il souligne ainsi qu'à NOAA/NWS/EMC c'est le manque de programmeurs qui a constitué un problème «*to effect fully code transition*».

30 Dictionnaire historique de la langue française.

31 Le Robert.

pas vraiment les acteurs de l'industrie spatiale mais les utilisateurs potentiels. Rappelons ici cette citation de John Derber *«I remember an important NASA scientist coming and giving a presentation about AIRS before it was launched. He stated that since the instrument would be twice as good as the HIRS instrument, it would cut the forecast error in half.»* Nous venons de montrer combien ce raisonnement est erroné du fait de la complexité de données spatiales comme les radiances et, de démontrer que leur valorisation dépend d'algorithmes qui les calibrent puis les assimilent dans des modèles[32].
Afin de bien indiquer qu'il peut exister différentes générations de données et d'algorithmes, nous proposons de représenter le problème de la manière suivante (Lenfle & Kazakçi, 2015). Considérons simplement que :

- $Data_1$ correspond aux mesures directes et synoptiques
- $Algo_1$ à l'interpolation optimale
- $Data_2$ aux mesures satellites comme les radiances
- $Algo_2$ aux méthodes variationnelles

Notre histoire montre que la combinaison **$Algo_1$ ($data_2$)** n'apporte aucune valeur car elle ne permet pas d'améliorer la qualité des prévisions. Il faut une rupture dans les algorithmes pour que **$Algo_2$ ($data_2$)** améliore enfin les prévisions. Et il s'agit d'un processus de conception spécifique qui, dans ce cas, dure une décennie et mobilise l'équivalent de cent personnes en équivalent temps plein. On appréhende ici l'ampleur de la tâche et les raisons des conclusions des rapports de la NRC soulignant la nécessité d'une structuration en termes d'équipe, de processus et de moyens.

CONCLUSION : QUELS ENSEIGNEMENTS POUR LES SERVICES INTÉGRANT DES DONNÉES SPATIALES ?

Pour conclure, nous soulignerons les spécificités de la météo pour réfléchir plus généralement au processus de conception des usages de la donnée, puis nous esquisserons quelques conséquences pour le CNES et notamment le passage d'une logique de mission à une logique de système.

Les spécificités du cas météo

La météorologie constitue à bien des égards à la fois un cas emblématique d'usage des données spatiales et une situation très spécifique. En effet,

32 Sur ce point voir également la remarquable thèse de Gemma Cirac (2014).

depuis la création de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) sous l'égide de l'ONU en 1950, la météorologie est un écosystème extrêmement structuré. L'OMM a ainsi mis en place et gère depuis 1963 le World Weather Watch. Il s'agit d'un réseau de collecte, de transmissions et d'analyse des données, coordonné au niveau mondial, et dont le cœur est le Global Observing System (GOS, *figure 15*)[33]. L'ampleur et le degré de perfectionnement de cette organisation (standardisation des types de données, des instruments, des heures de collectes, etc.) ont amené Paul Edwards à parler d'*infrastructural globalism* pour qualifier cet écosystème. Enfin, la prévision numérique du temps est opérationnelle depuis le milieu des années cinquante et n'a cessé de s'améliorer depuis. L'héritage (*legacy* en anglais) est donc considérable.

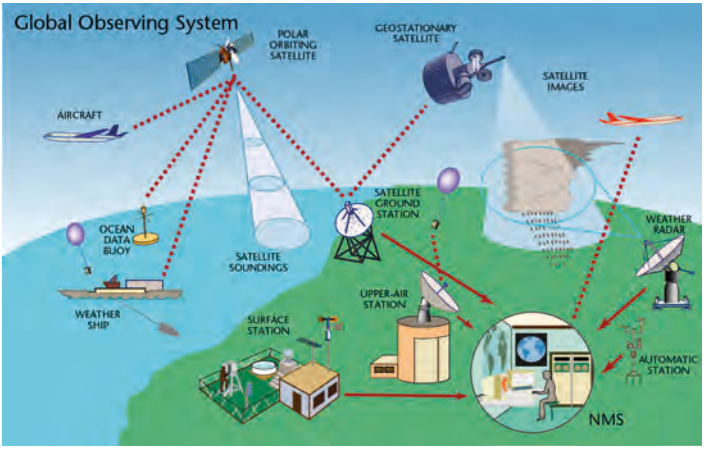


Figure 15 – Le GOS du world weather watch
Source : http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/images/GOS-fullsize.jpg

Nous en retenons quatre conséquences importantes :

1. *Les satellites sont connus et on* « sait »[34] *ce qu'ils mesurent* : des radiances dans le cas qui nous intéresse (et on « connaît » la fonction de transfert radiatif)

33 Sur l'histoire de ce système voir Edwards, 2010

34 Nous utilisons des guillemets car l'analyse montre que cette connaissance ne peut être considérée comme totalement donnée et est largement à construire pendant le projet.

2. *La physique de l'atmosphère et les modèles associés sont* « connus ». Ils restent toutefois extrêmement complexes et évoluent en permanence.

Ces deux premiers points font que l'on sait ce que l'on cherche : une meilleure information de température en particulier en termes de couverture ; information que seule les satellites sont capables de fournir globalement. Par conséquent, et c'est un point central, il n'y a pas de débat sur la valeur. On sait que si l'on arrive à exploiter correctement les données satellites alors la prévision s'en trouvera améliorée, la valeur de cette dernière étant évidente. L'histoire précédente fait ainsi l'économie de controverses entre experts autour de la valeur de la prévision météorologique. Les controverses portent uniquement sur la valeur des données satellites, pas sur les modèles et leurs apports.

3. *La météorologie est, comme nous venons de l'expliquer, un monde très structuré et normalisé*. L'écosystème est en place et l'infrastructure technique existe. Les centres météo, tel l'ECMWF, constituent des archétypes des « centres de calculs[35] » étudiés par Bruno Latour : ce sont des lieux d'accumulation scientifique, les nœuds d'un réseau global qui concentre l'information, la traite, puis la redistribue. Pour ce faire, ils concentrent une quantité énorme de moyens : supercalculateurs, chercheurs, gigantesques archives, modèles de prévisions, doctorants et post-doctorants, etc. Si on se limite aux données spatiales, le réseau de collecte et de traitement de l'information est en place *(figure 16)*.

Ce point est fondamental car, à aucun moment dans notre cas, les acteurs n'ont été confrontés au problème, majeur pour toute innovation, de la mise en place de l'environnement nécessaire à son succès. Or, on sait que la mise en place de cet environnement, qu'on le nomme écosystème ou réseau technico-économique, constitue un des obstacles majeurs à surmonter pour le déploiement des innovations. Le processus est long et complexe ; il se déroule ici avant la période étudiée. Le contexte du cas est donc sur cette dimension très favorable. Les acteurs sont intéressés, l'infrastructure technique est en place, l'écosystème aussi, les modèles existent, etc.

35 Sur le concept de « centre de calcul » voir Latour (1989 et 1996). On notera que, dans l'article de 1996, Latour utilise notamment une carte météo produite par Météo France pour illustrer l'activité des centres de calculs.

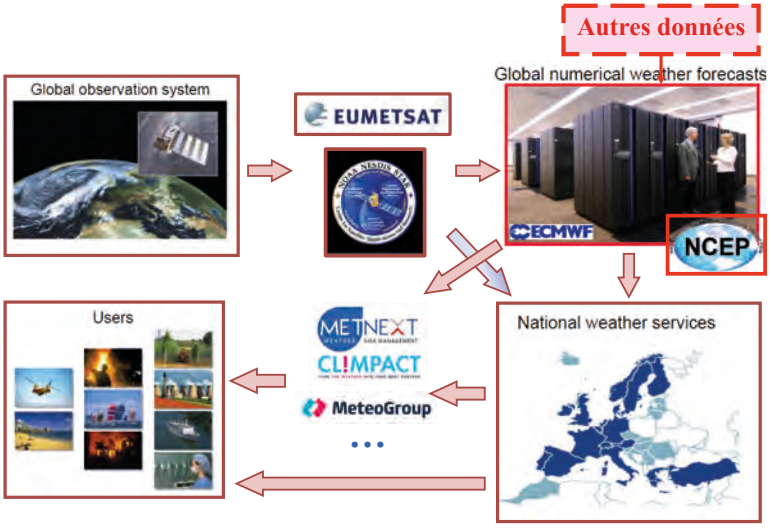


Figure 16 – L'écosystème de la météorologie spatiale

4. Mais *les contraintes opérationnelles* imposées par la prévision météorologique sont *extrêmement strictes*. Un centre météo peut se comparer à une usine dont le métier est de produire une prévision deux fois par jour à heures fixes. Ceci impose des contraintes sévères à la fois sur les données (continuité des données, contrôle qualité[36], temps réel, etc.) et sur les délais de la prévision qui, comme nous l'avons vu, sont très courts. La *figure 17* illustre ce point dans le cas de la NOAA/NCEP.

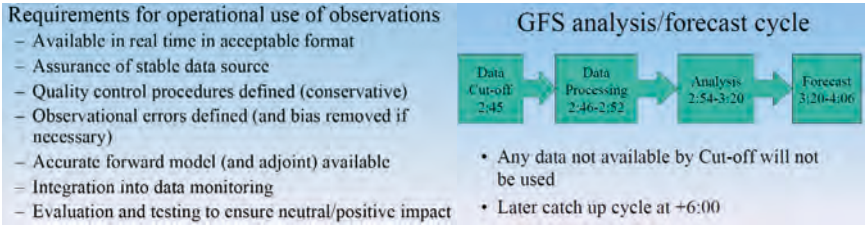


Figure 17 – Les contraintes de la prévision opérationnelle au NOAA/NCEP (Derber, 2011).

36 John Derber nous a ainsi expliqué lors d'une discussion à l'ECMWF que : « *In a study we've found that quality control problems may be the biggest source of errors in nwp, much bigger than the others sources* » (entretien à l'ECMWF, 8 septembre 2014)

Ceci tempère le côté favorable du contexte souligné précédemment. Car, comme nous l'avons vu, les contraintes de délais supposent l'invention de nouveaux algorithmes pour que les temps de calcul deviennent compatibles avec les contraintes opérationnelles. Ensuite, parce que l'introduction d'une nouvelle donnée ne doit pas venir perturber le processus opérationnel, il est hors de question d'introduire des bugs ou des données qui dégraderaient la prévision car, comme l'exprime Philippe Courtier : « *une mauvaise prévision, c'est des morts* ». Pour ce faire les météorologues mettent en concurrence les deux systèmes d'assimilation de données avant de basculer opérationnellement vers le nouveau. Ce qu'ils appellent une chaîne en double et qui consiste à faire la même prévision avec les deux systèmes en parallèle pour comparer systématiquement leurs performances opérationnelles

Elle souligne en même temps la difficulté de l'introduction d'une donnée dans un système opérationnel aux exigences infiniment supérieures à celles d'un modèle expérimental. Démontrer théoriquement l'intérêt de l'assimilation variationnelle n'est que le début d'un long processus jusqu'à la mise en œuvre opérationnelle.

Le cas de l'assimilation des radiances dans les modèles de prévision numérique du temps, frappe par l'extraordinaire complexité du processus de construction de la valeur de la donnée, malgré les éléments favorables cités précédemment, complexité largement masquée par les notions « d'aval » ou « d'applications » *(figure 18)*. L'hypothèse, souvent implicite dans l'industrie spatiale, qu'une meilleure donnée va nécessairement créer de la valeur (cf. la citation de Derber sur HIRS/AIRS) s'avère totalement fausse. Ici, il aura été nécessaire de reconcevoir les modèles et les méthodes d'assimilation pour réussir à extraire des radiances, une information utile. Nous avons vu qu'il s'agit d'un travail d'une grande complexité qui mêle inextricablement la recherche, le développement, les exigences opérationnelles, la programmation, les calculateurs, etc.

Nous avons vu également que cela suppose une connaissance extrêmement fine des modèles mobilisés par les utilisateurs. On trouvera dans le chapitre suivant, l'exemple du réglage de la matrice B pour extraire correctement les informations de température issues des radiances. Il est très parlant puisque, même après la mise en place des méthodes variationnelles, c'est à ce niveau de détail que le problème est enfin résolu. On comprend dès lors l'insistance de la NRC sur la mise en place d'un processus de transition entre la recherche et le passage à l'opérationnel.

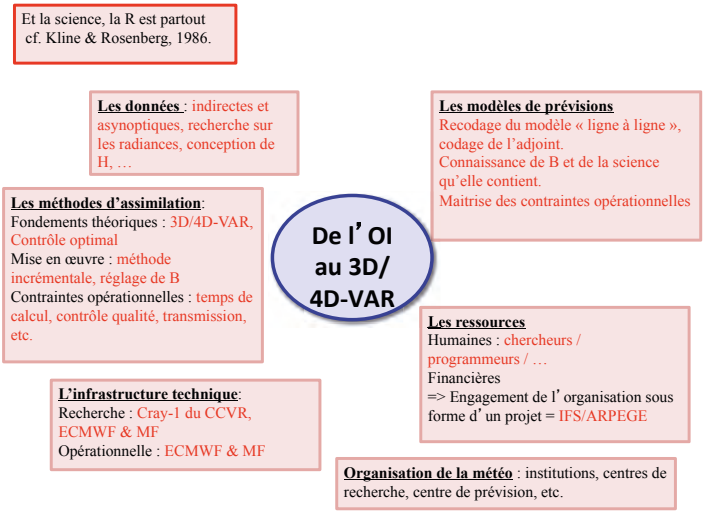


Figure 18 – Les éléments du processus de conception de la valeur de la donnée.

Pour le CNES cet exemple permet de préciser deux points importants :

1. Le cas de l'assimilation des radiances permet d'ouvrir les boîtes noires que constituent les notions, très présentes dans le secteur spatial, « d'aval » ou « d'application », de les déconstruire ou, plutôt, de leur donner corps. « L'aval » est un écosystème complexe composé d'institutions (ex : l'OMM), de centres de calcul (Ex : l'ECMWF), de modèles (ici de PNT), de méthodes d'assimilation, d'acteurs, de connaissances scientifiques et de pratiques, de contraintes opérationnelles (souvent locales). La mise en place et l'*alignement* de toutes ces composantes constituent un élément central de tout processus d'innovation. C'est un processus de conception et il nous semble dangereux de croire que la donnée, une fois mise à disposition se diffuserait seule. Si personne ne s'engage dans ce processus, la donnée innovante se perd dans la vallée de la mort.
2. Ce cas permet aussi d'apprécier la temporalité de ces processus. Il n'aura pas fallu moins de dix années de travail pour passer du concept de l'assimilation variationnelle à sa mise en œuvre opérationnelle[37]. Lors des entretiens, cet ordre de grandeur est revenu fréquemment, qu'il s'agisse

37 Sans même évoquer le délai depuis le lancement du premier sondeur atmosphérique en 1969.

des données AMSU utilisées pour analyser la réflectivité des sols neigeux[38] ou encore des données IASI (voir l'encadré page suivante). Autrement dit si l'on attend que le satellite soit lancé, que les applications soient prêtes, que les clients soient demandeurs, que les usages soient matures, il est déjà beaucoup trop tard. Il faudra attendre des années pour que la donnée soit effectivement utilisée, si elle l'est. La conséquence est très claire : il faut anticiper ces questions très en amont et commencer le travail sur la donnée en même temps que le développement de l'objet car leurs durées de développement sont similaires. Si on ne mène pas ce travail en même temps que le développement de l'instrument, les exemples passés montrent que la vallée de la mort devient infranchissable. Les estimations proposées par les rapports NRC de « *two or more scientists for two to five years before launch if the new instrument is to be used efficiently shortly after launch* » sous-estiment sans doute la tâche.

D'une logique mission à une logique système[39]

Plus généralement les points précédents nous semblent symptomatiques d'une tendance de fond dans le métier du CNES : le basculement d'une logique mission centrée sur un instrument, à une logique de système ou d'écosystèmes incluant les fournisseurs, les *complémentors*[40] *ou « fournisseurs de biens complémentaires »*, les instances de régulation, etc. Le projet européen GMES/Copernicus ou, en France, Mercator Océan montrent le rôle clé de la mise en place de plateforme entendue ici comme « *des produits, services ou technologies développés par une ou plusieurs entreprises, et qui servent de fondation sur lesquelles d'autres entreprises peuvent construire des produits, services ou technologies complémentaires* » (Gawer, 2009 et encadré ci-dessous).

Toute la difficulté réside, au-delà des schémas de principes, dans la conception et la mise en place de ces plateformes : quels acteurs, quelles infrastructures techniques, quels usages, quels modèles économiques ?

Le problème est d'autant plus complexe que le rôle du CNES dans leur mise en place n'est pas évident. Il s'agit d'une part de déterminer la contribution du spatial à ces « services » (cf. Lenfle & Midler, 2012) et, d'autre part, le rôle du CNES, en tant qu'acteur public, dans la mise en place de ce type de plateforme. En effet, sa mission n'est pas de devenir un opérateur de services

38 1998 – 2008 voir Florence Rabier

39 Cette section s'appuie largement sur Lenfle & Midler, 2012.

40 Cf. Encadré 2. De la chaîne de valeur au management des plateformes.

mais il peut jouer un rôle de catalyseur (Evans, 2009), comme il l'a fait par le passé (Spot Image, Mercator Océan).

Sa mission serait alors d'initier et cofinancer des projets pour fédérer et mettre en relation différents acteurs qui sans son intervention n'utiliseraient pas les données spatiales. Il lui faudra pour cela articuler sa stratégie, centrée sur la composante spatiale, à celles d'autres parties prenantes qu'il doit identifier. Il lui faut également concevoir des « démonstrateurs » adaptés à des enjeux qui ne se limitent pas aux dimensions techniques. C'est un axe de réflexion stratégique important pour le CNES qui renvoie à une question générique : jusqu'où doit s'impliquer le spatial dans la conception de nouveaux services et, en corollaire, jusqu'où doit-il s'impliquer en « aval » ?

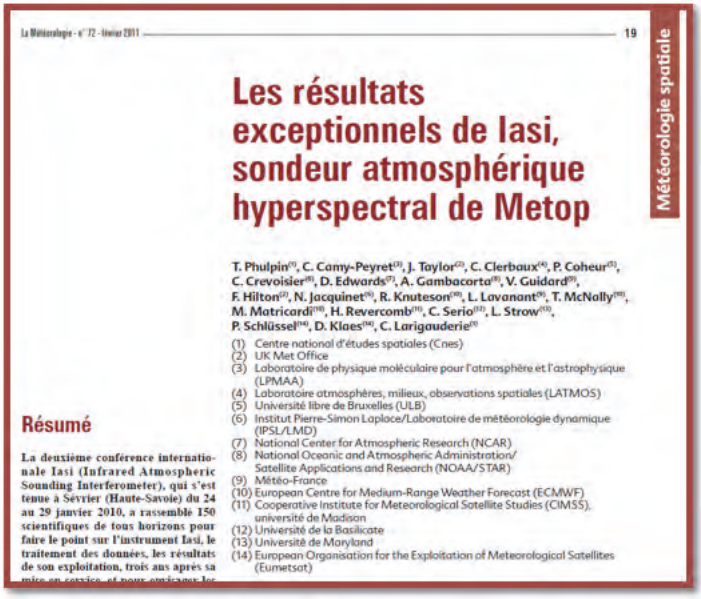
Encadré 1 : À propos de IASI, sondeur hyperspectral de MetOp.

Lancé en 2006 IASI, qui n'était pas l'objet de la présente recherche, est revenu à plusieurs reprises dans les entretiens avec Philippe Courtier, Jean Pailleux et Jean-Noël Thépaut. Ce sondeur hyperspectral présente des performances à bien des égards exceptionnelles par sa précision (mesure sur 8 164 canaux ; voir Phulpin & al, 2011) et par la rapidité de l'assimilation des données dans les modèles de prévisions numériques du temps (18 mois après le lancement, ce qui est extrêmement court). Compte tenu du temps nécessaire pour assimiler les radiances, ce deuxième point nous a particulièrement intéressé. Il ressort ainsi des entretiens que IASI a bénéficié du travail sur l'assimilation effectué en amont. Trois points, qui mériteraient d'être approfondis dans de futures recherches, nous semblent importants :

1. La mise en place dès 1996 de l'ISSYWG (International IASI Sounding Scientific Working Group) par le CNES et EUMETSAT. Un travail de fond sur les données a ainsi débuté dix ans avant le lancement de l'instrument ;
2. Ce groupe de travail a été piloté par des experts du 4D-VAR, d'abord Jean-Noël Thépaut puis Florence Rabier qui ont joué un rôle important dans IFS/ARPEGE. Les méthodes d'assimilation de ce type de données étaient donc en place depuis 1996-1997 à l'ECMWF
3. IASI est le second sondeur à haute résolution. Il est lancé 4 ans après l'AIRS du JPL. Par conséquent il bénéficie du travail important déjà réalisé par l'ECMWF pour intégrer ces nouvelles données.

Reste, et c'est un point qui nous semble important à noter, que l'on retrouve là aussi un délai de l'ordre d'une décennie sur l'assimilation d'une nouvelle donnée. Jean-Noël Thépaut confirme ce point : «*Quand on sait qu'un instrument va être lancé, il faut commencer à travailler dessus au moins dix ans avant pour faire toutes les études, comprendre la physique de la mesure, la science de l'inversion, il faut aussi marier ça avec l'évolution des systèmes d'assimilation, donc il faut avoir une vue holistique des systèmes tels qu'ils seront quand le satellite sera lancé et donc [pour IASI] on a commencé à travailler là-dessus en 1995.*»

Note : nous reprenons ci-dessous la première page d'un article paru dans la revue *La Météorologie* car la liste des contributeurs, tous membres de l'ISSWG, donne une idée de la diversité des institutions impliquées dans ce travail très en amont sur les données IASI.



La Météorologie - n° 72 - février 2011 19

Météorologie spatiale

Les résultats exceptionnels de Iasi, sondeur atmosphérique hyperspectral de Metop

T. Phulpin[1], C. Camy-Peyret[2], J. Taylor[3], C. Clerbaux[4], P. Coheur[5], C. Crevoisier[6], D. Edwards[7], A. Gambacorta[8], V. Guidard[9], F. Hilton[3], N. Jacquinet[4], R. Knuteson[10], L. Lavanant[9], T. McNally[11], M. Matricardi[12], H. Revercomb[13], C. Serio[12], L. Strow[13], P. Schlüssel[14], D. Klaes[14], C. Larigauderie[1]

(1) Centre national d'études spatiales (Cnes)
(2) UK Met Office
(3) Laboratoire de physique moléculaire pour l'atmosphère et l'astrophysique (LPMAA)
(4) Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (LATMOS)
(5) Université libre de Bruxelles (ULB)
(6) Institut Pierre-Simon Laplace/Laboratoire de météorologie dynamique (IPSL/LMD)
(7) National Center for Atmospheric Research (NCAR)
(8) National Oceanic and Atmospheric Administration/ Satellite Applications and Research (NOAA/STAR)
(9) Météo-France
(10) European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)
(11) Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), université de Madison
(12) Université de la Basilicate
(13) Université de Maryland
(14) European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (Eumetsat)

Résumé

La deuxième conférence internationale Iasi (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), qui s'est tenue à Sévrier (Haute-Savoie) du 24 au 29 janvier 2010, a rassemblé 150 scientifiques de tous horizons pour faire le point sur l'instrument Iasi, le traitement des données, les résultats de son exploitation, trois ans après sa

Encadré 2. De la chaîne de valeur au management des plateformes.

Les recherches sur les stratégies des firmes des secteurs de l'informatique et des télécoms ont conduit à réviser profondément les outils conceptuels d'analyse de l'environnement, en particulier la représentation en termes de chaîne de valeur. Les travaux d'A. Gawer ont notamment mis en évidence le rôle fondamental des stratégies dites de plateformes dans le succès de firmes comme Intel, Cisco, NTT Docomo, Microsoft ou, plus récemment, Apple. Gawer entend par là, la mise en place par l'entreprise d'un écosystème favorable à ses produits comprenant des clients et des fournisseurs mais également ce qu'elle appelle des *complementors* c'est-à-dire des entreprises qui ne sont ni des clients, ni des fournisseurs mais qui pourtant jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement et l'attractivité de l'écosystème. Dans le cas historique d'Intel, la performance du microprocesseur n'est visible pour le client que si l'ensemble des composants de l'ordinateur exploite ses possibilités. Il est ainsi essentiel pour Intel que les fabricants de BUS, de cartes graphiques, de jeux vidéos, qui ne sont ni des clients, ni des fournisseurs, intègrent dans leurs produits les évolutions de la puce. Ceci explique la stratégie d'Intel consistant à mettre très tôt à disposition de ces entreprises des prototypes des futurs CPU, à prendre en charge certains développements, à explorer des nouveaux usages des puces, etc. De même, on ne peut comprendre le succès d'Apple sans analyser la façon dont l'entreprise à su constituer un écosystème attractif comprenant ses produits mais aussi l'ensemble des services associés développés par des tierces parties qui participent, moyennant rémunération, à la conception des fameuses applications. La littérature existante sur les stratégies de plateforme montre la complexité et la nouveauté des questions posées pour concevoir et mettre en place une plateforme « leader », questions qui sont de quatre ordres :

1. Technique : quelle architecture pour la plateforme ? avec quels standards ?
2. Économique : qui faire payer dans une situation de marché « multi-sided » où il peut être intéressant de faire payer moins certains acteurs pour en attirer d'autres (ex : les cartes de crédits sont « gratuites » pour les clients mais payantes pour les commerçants. Voir Evans & al, 2006) ?
3. Stratégique : faut-il favoriser une plateforme « fermée » sur le modèle d'Apple ou, au contraire, l'ouvrir comme Androïd ?
4. Organisationnel : comment organiser la coopération dans l'écosystème de la plateforme ? Qui assume le rôle de « *platform leader* » ?

Le concept de plateforme permet ainsi de penser des formes de relations interentreprises différentes du traditionnel rapport client/fournisseur. Il permet de comprendre les formes nouvelles de coopétitions entre les entreprises. Il montre aussi l'intérêt de se positionner à un niveau d'agrégateurs en amont de l'application finale, laissée par exemple au développeur dans le cas de l'IPhone. Nul doute qu'il y a là un enseignement important pour le CNES.

Les recherches effectuées avec le CNES depuis maintenant quatre ans permettent de mettre en évidence deux logiques quant à la relation aux applications :

1. Dans la première logique, le rôle du CNES est avant tout de faire progresser les connaissances scientifiques. L'agence se positionne alors comme un fournisseur de données ; leur exploitation est laissée aux acteurs de l'aval qui s'en emparent pour développer de nouveaux produits. Dans cette perspective, le CNES n'a pas à s'impliquer dans le développement des services qui sont considérés comme ne relevant pas de sa compétence. L'essentiel est de répondre aux questions posées par les scientifiques, par exemple s'agissant du climat, la contribution du spatial au suivi des variables climatiques essentielles. Le risque est évidemment que rien ne se passe. L'absence d'application susceptible de rendre légitime les investissements nécessaires, engendre un cercle vicieux qui bloque toute dynamique d'innovation et conduit le projet directement dans la « vallée de la mort ».

2. Une autre stratégie consiste, pour le CNES, à s'impliquer en aval afin de faciliter le développement des produits et des applications (franchir le gouffre dirait G. Moore, 1997). C'est historiquement le choix fait par le CNES, avec le succès que l'on sait, en matière d'imagerie spatiale (Spot Images créé en 1982 par le CNES, l'IGN et différents industriels du spatial) et en matière d'océanographie opérationnelle (création de CLS en 1986 avec l'IFREMER et un consortium de banques, projet Mercator Océan, lancé en 2001 par le CNES, l'IFREMER, Météo-France, le SHOM et le CNRS). L'objectif est double puisqu'il s'agit à la fois de contribuer financièrement aux investissements nécessaires au développement des applications et de construire l'écosystème nécessaire à la fourniture de ces services. Une structure comme Mercator Océan a ainsi pris en charge des investissements qu'aucun utilisateur n'aurait pu réaliser compte tenu de la taille limitée des marchés concernés. Ce n'est qu'en agrégeant différents usages

que l'on parvient à créer une masse critique justifiant les investissements nécessaires (en l'occurrence dans le cas de Mercator, un modèle qui propose une représentation 3D de l'océan[41]).

Ces deux stratégies sont probablement complémentaires. Mais si la première s'inscrit naturellement dans l'histoire du CNES, la seconde constitue toujours une extension de son périmètre d'activité. Cette question se pose pour toutes les organisations évoluant dans un écosystème complexe et dont l'activité dépend d'autres organisations qui ne sont ni ses « clients », ni ses « fournisseurs ». Là encore, les travaux d'A. Gawer sur Intel et le *platform leadership* illustrent cette tension et montrent l'intérêt qu'il y a à s'impliquer en aval (via des consortiums, des partenariats…), à stimuler la création d'usages, de standards ou d'innovation chez les partenaires… sans toutefois prendre leur place (s'intégrer verticalement pour reprendre un concept classique). C'est cette stratégie qui a permis à Intel de faire évoluer son écosystème à la même vitesse que ses microprocesseurs. Les exemples de SPOT, Mercator Océan et CLS montrent que le CNES a su, historiquement, adopter cette stratégie.

Le cas de l'assimilation des radiances par les modèles de prévision numérique du temps illustre l'importance et la diversité des acteurs impliqués dans l'utilisation des données spatiales. Ici, l'écosystème de la météorologie préexistait. Il n'était pas nécessaire de le construire. On retient cependant qu'il est fort peu probable que des données aussi complexes que les données satellite se diffusent d'elles-mêmes et prennent leur valeur comme par enchantement.
Nous avons maintenant toutes les raisons de considérer que le processus sera d'autant plus difficile que :

- La valeur (de la donnée et/ou des modèles) fait débat ;
- Les communautés d'utilisateurs sont peu structurées
- Les modèles sont en cours d'élaboration
- L'infrastructure technique est à construire
- Les ressources ne sont pas disponibles.

Ceci suppose probablement une réflexion sur des outils de suivi de la maturation de l'écosystème, sur le modèle de ce qui existe pour les systèmes techniques (le TRL). La difficulté consistera à qualifier l'aval : les acteurs

41 Qui est maintenant devenu un acteur incontournable de l'océanographie dans le monde et la composante principale du projet Copernicus/MyOcean.

avec lesquels le CNES interagit, les obstacles à surmonter, l'identification des budgets utilisables pour le travail sur la donnée, la mise en place de base de données ou des expérimentations avec les futurs utilisateurs, etc. Et les modalités pour réussir la mobilisation de tout cela.

Enfin et pour conclure, ce travail interroge la pertinence du schéma de la NRC qui sépare, de manière assez linéaire, la phase de recherche précédant le lancement de satellites opérationnels de la phase d'intégration des données dans des systèmes opérationnels lorsque le satellite est en exploitation. Le cas de l'océanographie opérationnelle (Le Pellec-Dairon, 2013) montre que le processus n'a pas cette linéarité, au contraire, on remarque que les acteurs ont anticipé pendant la conception du satellite de recherche (Topex/Poseidon) la structuration de la communauté d'utilisateurs et qu'ils ont poursuivi cette structuration une fois le satellite lancé (1992), via le projet Mercator (1995) ; le financement de la lignée de satellite opérationnels (Jason-1, 2001) a contribué la consolidation de l'écosystème de l'océanographie opérationnelle (intégration d'EUMETSAT en 2004 puis de la NOAA). On a là une démarche de conception des écosystèmes d'usage concourante à celle de l'objet technique *(figure 19)*.

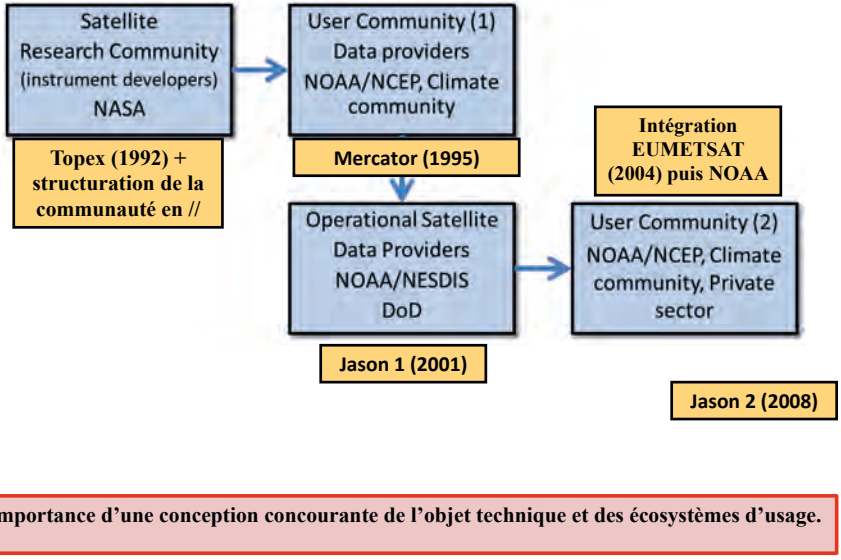


Figure 19 – Les vallées de la mort revisitées

Encadré 3 : L'exemple de l'hydrologie

Considérons, de manière volontairement simplificatrice, le cas de la gestion de l'eau pour lequel les techniques spatiales semblent avoir un potentiel important (voir la mission GRACE de la NASA ou encore la mission SWOT en cours de conception). Le processus de conception de l'usage de la donnée sera à l'évidence extrêmement complexe. D'abord, car il s'agit de phénomènes locaux pour lesquels les grands modèles, tels ceux que l'on trouve en météo ou en océanographie hauturière, sont inadaptés. Ensuite, parce que car les acteurs sont extrêmement dispersés. Il n'existe pas en hydrologie l'équivalent des grands organismes et des centres de calculs afférant, tel l'ECMWF ; les réglementations sont complexes et différentes d'un pays à l'autre, il existe déjà une grande variété de bases de données, etc. Enfin car il faudra déterminer qu'elle(s) est (sont) la (les) mesure(s) pertinente(s). On entrevoit alors la complexité d'un processus de conception qui devra prendre en compte les collectivités territoriales, les différents utilisateurs (industriels, agriculteurs, acteurs du tourisme…), les agences de bassin, les opérateurs tels Veolia ou Suez, les bureaux d'études, l'ONEMA, la police de l'eau, les centres de recherche en hydrologie, etc. Mais le cas de l'assimilation des radiances nous montre qu'il faudra également avoir une connaissance fine des pratiques des différents acteurs, des modèles qu'ils utilisent (ou non), des données qui les nourrissent, des méthodes d'assimilation, des contraintes opérationnelles auxquelles ils sont confrontées, etc.

Renouveler le dominant design : histoire du changement de méthode d'assimilation des données pour la prévision numérique du temps

Sylvain Lenfle, professeur au CNAM et chercheur au laboratoire I3, Centre de Recherche en Gestion, École Polytechnique.

Un système de prévision numérique du temps comporte deux étapes : l'assimilation de données pour déterminer les conditions initiales, et la prévision proprement dite. La qualité de la prévision dépend de la détermination des conditions initiales. Or, en météorologie, les données à assimiler proviennent de sources très variées : ballons-sondes, stations au sol, avions, bateaux, satellites, etc. Chacune possède des caractéristiques spécifiques. Toute nouvelle donnée doit passer à la moulinette de ces méthodes d'assimilation et démontrer son apport à la prévision. Jusqu'au milieu des années quatre-vingt, les méthodes d'assimilation dominantes, dites d'interpolation optimale, butent sur l'assimilation des données satellite. Ce chapitre relate le travail conduit afin de réussir à valoriser le potentiel informatif des données satellite pour la prévision numérique du temps.

L'INTERPOLATION OPTIMALE ET SES LIMITES

Pour déterminer la condition initiale de la prévision, les météorologues utilisent un modèle numérique gourmand en données. L'une des principales difficultés tient au décalage entre d'une part, les besoins gigantesques du modèle et d'autre part, le nombre d'observations disponibles. C'est pourquoi, les météorologues utilisent les observations disponibles et comblent les manques avec les informations de la prévision précédente (dite ébauche, first-guess ou background).
Dans cette opération d'assimilation de données, le problème consiste à faire correspondre toutes les informations avec la grille totalement standardisée du modèle (cf. Edwards cité précédemment). La technique utilisée par les principaux centres de météorologie dans le monde, jusqu'au milieu des années quatre-vingts, est l'interpolation optimale. Schématiquement, elle consiste à estimer, via des méthodes statistiques, la valeur en chaque point de grille du modèle à partir d'un nombre réduit d'observations situées au voisinage du point de grille, *(figure 1)*.

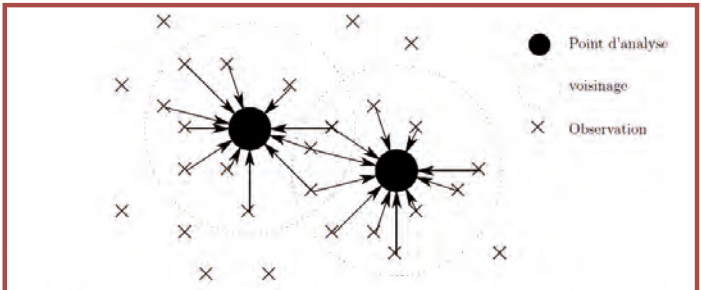


FIG. 5.1 – Représentation schématique de la sélection des observations au voisinage de deux points. Les analyses en ces deux points n'utilisent pas les mêmes observations bien qu'ils soient proches. Les champs analysé n'est donc généralement pas continu. De plus, le coût de l'analyse augmente avec la taille du voisinage utilisé.

Figure 1 – Principe de l'interpolation optimale (Daget, 2007).

Dès les années quatre-vingts, l'interpolation optimale présente des limites importantes que les chercheurs essaient de dépasser. La principale concerne *l'impossibilité d'un traitement dynamique de l'incertitude* associée aux observations. Cette limite, totalement indépendante de la question de l'intégration des données satellite, pousse les chercheurs, au premier rang

desquels Olivier Talagrand, à étudier d'autres approches. La conséquence de cette situation est un décalage croissant entre les méthodes d'assimilation et les exigences des modèles. Comme l'explique François-Xavier Le Dimet : «*Au départ, les modèles météorologiques avaient une grosse maille et l'interpolation optimale suffisait. Et petit à petit, les modèles se sont améliorés, avec des échelles beaucoup plus fines ; l'assimilation de données est devenue le point faible de la prévision. La condition initiale obtenue avec l'interpolation n'était pas de qualité suffisante pour une bonne prévision. À la fin des années quatre-vingts/quatre-vingt-dix [...] on a fait de gros efforts sur l'assimilation qui constituait le point crucial pour l'amélioration de la prévision*».

La deuxième limite de l'interpolation optimale liée à l'intégration des données satellite est signalée par Woods dans son histoire de l'ECMWF «*it seemed that a plateau had been reached in the Centre's forecast accuracy. [...] Dave Burridge* [directeur de la recherche] *had the growing feeling that in fact the Centre's Optimum interpolation data assimilation system had been pushed to its limit. The many different kinds of data coming from the satellite instruments were not just being used optimally. Something needed to be done here, but it was not clear just what*»[1] Cette question sans avoir motivé les recherches d'Olivier Talagrand, devient pressante dans les années quatre-vingts. Le débat américain touche l'Europe ; la question des méthodes d'assimilation permettant d'intégrer les données spatiales reste ouverte.

La troisième limite de l'interpolation optimale tient à la quantité de données produites par les satellites. Selon Philippe Courtier, le coût de l'interpolation optimale croît comme le cube du nombre de données et augmente encore avec le nombre de types de données. Les données satellitaires provoquent une rupture sur ces deux dimensions : quantité[2] à traiter et complexité de la donnée.

1 Woods, 2006, p. 94.

2 Il s'agit là d'un problème important posé par les techniques spatiales. Pour le cas de l'océanographie voir Conway (2006).

LA REMISE EN CAUSE D'UN DOMINANT DESIGN OU L'IMPOSSIBLE RÉCONCILIATION TECHNOLOGIQUE

L'importance de la technique de l'interpolation optimale correspond à ce que la littérature en management de l'innovation appelle un *dominant design*. Ce concept proposé par Abernathy et Utterback (1978) est issu de l'étude sur la longue période de l'évolution industrielle. Il montre que le processus d'innovation débute par une innovation de produit (la machine à écrire, l'automobile, l'ordinateur de bureau…). Celle-ci donne naissance à une multitude de prototypes (et souvent autant d'entreprises) qui, tous, cherchent à améliorer le concept de base. Ce foisonnement se poursuit jusqu'à l'émergence d'un «*dominant design*» qui synthétise les expériences passées dans un produit qui satisfait les exigences de la plupart des utilisateurs. Cette phase de stabilisation des paramètres de conception sous-jacents au produit (une voiture possède quatre roues, dispose d'un démarreur électrique, d'un moteur à explosion, etc. ; un ordinateur de bureau se compose d'un moniteur, d'un disque dur intégré, d'un clavier…) se traduit également par une standardisation des processus de conception du produit et des organisations qui les conçoivent, celles-ci s'organisant autour du *dominant design*. Il devient, de ce fait, extrêmement difficile d'en sortir.
Ce concept est utile pour analyser les problèmes soulevés par l'assimilation des radiances. Un *dominant design* de l'assimilation des données est en place dans les années quatre-vingts, quatre-vingt-dix *(figure 2)*.

Type d'instrument	In situ (bouées, stations sols, ballons sondes, etc.)
Nature de la mesure	Conventionnelle : directe et synoptique*
Méthodes d'assimilation	Interpolation optimale
Base théorique	Estimation statistique

* À heures fixes.

Figure 2 – Le dominant design de l'assimilation dans les années 80 – 90.

Les données satellite le remettent en cause parce qu'elles sont asynoptiques, indirectes et reliées par des fonctions non-linéaires aux variables du modèle. Leur assimilation est difficile, voire impossible avec le *dominant design* composé par les infrastructures techniques de l'époque et l'interpolation optimale.

L'obstacle sera franchi grâce à de nouvelles technologies de calcul et l'invention de nouvelles méthodes d'assimilation, dites variationnelles, qui s'appuient sur d'autres bases théoriques que l'estimation statistique. C'est l'objet de la partie suivante.

L'ÉMERGENCE DE L'ASSIMILATION VARIATIONNELLE

Principe et origine de l'assimilation variationnelle (VAR)

Le dépassement des limites précédentes va passer par le développement, principalement en Europe et aux États-Unis, de nouvelles méthodes dites d'assimilation variationnelle. Une rupture fondamentale est opérée puisque les bases conceptuelles de ces méthodes sont tirées des mathématiques appliquées. Dans l'assimilation variationnelle, les méthodes d'estimation de l'interpolation optimale sont remplacées par la minimisation d'une fonction de coût qui mesure l'écart entre les conditions initiales du modèle et l'ensemble des informations disponibles au moment de la prévision, c'est-à-dire les observations et la prévision précédente *(figure 3)* ;

Variational equations: for 1D-Var, 3D-Var, 4D-Var

Minimize:

$$J[x] = \tfrac{1}{2}(x-x^b)^T B^{-1}(x-x^b) + \tfrac{1}{2}(y^o-H[x])^T (E+F)^{-1}(y^o-H[x])$$

where x contains the NWP model state
x^b is background estimate of x (short-range forecast)
B is its error covariance,
y^o is vector of measurements
$H[...]$ is "observation operator" or "forward model",
mapping state x into "measurement space"
E is error covariance of measurements,
F is error covariance of forward model.

Source : Ey

Figure 3 – La fonction de coût de l'assimilation variationnelle (Eyre, 2007)

Deux variantes de la méthode sont alors envisageables : dans le 3D-VAR cette minimisation a lieu une fois au début de la prévision, alors que le 4D-VAR intègre également la dimension temporelle. Dans ce dernier cas, la méthode « *ne vise pas à obtenir l'état optimal à un instant donné, mais la trajectoire optimale sur une fenêtre de temps donné. Les observations sont prises en compte dans leur distribution spatiale aussi bien que tempo-*

relle. [...] le 4D-VAR [...] propage l'information apportée par les observations à l'instant initial de la fenêtre d'assimilation. De ce fait, l'analyse obtenue permet au modèle d'évolution d'avoir la trajectoire la plus proche possible de l'ensemble des observations utilisées. » (Daget, 2007, p. 45 et *figure 4*).

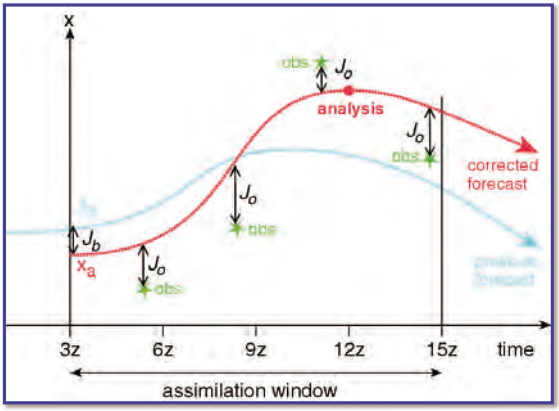


Figure 4 – Principe du 4D-VAR (ECMWF)

Si la mise en œuvre de cette méthode a eu lieu dans les années quatre-vingt-dix[3], ses racines sont anciennes. Le principe a été proposé dès 1955 par Y. Sasaki, Professeur à l'Université de l'Oklahoma, puis étudié par le même auteur dans une série d'articles au début des années soixante-dix (Sasaki, 1970 a, b & c). Pourtant la méthode reste longtemps un objet d'étude théorique, sans application concrète et sans beaucoup d'écho. Comme l'explique John Derber, « *in the form advocated by Sasaki, it was very difficult to see how this could be practical* ». Une des principales difficultés tient à la dimension gigantesque du problème, la matrice B, dite des covariances d'erreur d'ébauche, est en effet de dimension égale au nombre de variables du modèle. Par ailleurs *J [x],* la fonction de coût, intègre le modèle lui-même (*x* dans l'équation de la *figure 3*). La minimisation de la fonction *J* devrait donc supposer d'intégrer le modèle lui-même à chaque itération. Ceci fait exploser les coûts de calcul associés à cette méthode. Comme l'explique Philippe Courtier : « *admettons qu'on fasse trente itérations de minimisation* [de *J*]

3 En 1995 à la NOAA et en 1996 à l'ECMWF pour le 3D-VAR, en 1997 au centre européen pour le 4D-VAR.

le 4D-VAR coûte cent fois le prix d'une prévision à 24h. Il faut être capable pendant cette phase de minimisation de faire cent prévisions à 24h. Donc a priori ce n'était pas faisable et c'est intrinsèque au 4D-VAR ».

La méthode, dans son principe, dépasse la puissance des machines. Dans le même temps, Olivier Talagrand développe, dans sa thèse et dans des articles de 1981[4], d'autres méthodes d'assimilation visant à dépasser les limites de l'interpellation optimale en matière de prise en compte de l'incertitude. Là encore, ces travaux restent loin de toute application opérationnelle. Pourtant, à la fin des années 80, le nombre de publications consacrées à l'assimilation variationnelle décolle. Il suffit pour s'en convaincre de compter le nombre de publications consacrées à ces questions d'assimilation dans la revue de littérature réalisée par Courtier & al. en 1993. La *figure 5* montre ainsi une rupture frappante. Que s'est-il passé ? Comment une méthode a priori trop coûteuse en temps de calcul s'est-elle finalement imposée comme un nouveau *dominant design* en assimilation de données pour la météorologie ? La rupture est conceptuelle et provient de la rencontre entre la météorologie et les mathématiques du contrôle optimal.

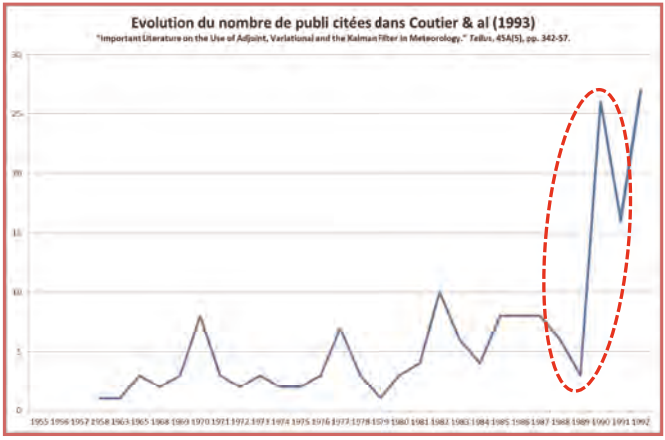


Figure 5 – Évolution du nombre de publication sur le VAR et le filtre de Kalman dans Courtier & al, (1993).

4 Talagrand, 1981a & b

Quand la météo rencontre le contrôle optimal

Dans cette même période, François-Xavier Le Dimet est professeur de mathématiques appliquées à l'université de Clermont-Ferrand. Il s'intéresse à la météorologie et a fait sa thèse sur la modélisation des processus stochastiques pour simuler la croissance et l'interaction des gouttes d'eau dans les nuages. C'est un spécialiste du contrôle optimal qui fait partie, sans en être l'élève, de l'école de mathématiques appliquées développée par Jacques-Louis Lions[5]. Il s'intéresse notamment à l'application des méthodes de contrôle optimal à la météorologie pour mieux prendre en compte la dynamique des phénomènes météo. Il étudie la question avec Y. Sasaki qui était en 1982 l'une des seules personnes travaillant sur les méthodes variationnelles en météo. Il passe quatre mois à l'université d'Oklahoma. *« La question pour moi à l'époque* était de savoir *si on pouvait appliquer le contrôle optimal à la météo ou si c'était complètement stupide. Et je n'en avais rigoureusement aucune idée* »[6]. Ces premiers travaux conduisent Le Dimet à soumettre un premier papier à la revue *Tellus* qui fait référence dans le champ de la météorologie. Dans un premier temps, c'est sans succès malgré les encouragements d'un des « reviewers ». Arrive alors la rencontre avec Olivier Talagrand qui s'avérera déterminante. Elle a lieu à Clermont-Ferrand en 1983 (ou 1984 ?), à l'occasion d'un congrès de la société française de physique sur la physique de l'atmosphère. Depuis sa thèse, Olivier Talagrand travaille sur l'assimilation de données. Il connaît très bien les problèmes opérationnels des météorologues et ses connaissances mathématiques sont suffisamment solides pour comprendre ce que fait Le Dimet. Il a déjà entendu parler des techniques adjointes (voir page suivante) via ses contacts avec des mathématiciens russes de l'école de G. Marchuk[7], mais sans en percevoir totalement l'intérêt compte tenu de l'obscurité des formalismes utilisés par les Soviétiques. Comme il l'explique : « *J'ai étudié dans ma thèse [1977] une méthode d'assimilation un peu simpliste (mais je ne savais pas comment faire autrement). Et ce n'est que lorsque j'ai rencontré François-Xavier Le Dimet que j'ai compris comment faire ce qui me semblait souhaitable. Le problème n'*étant pas tant l'*idée*

5 Sur Jacques-Louis Lions (1928 – 2001), Professeur au Collège de France (1973 – 1988), et son rôle central dans le développement d'une école française internationalement reconnue de mathématiques appliquées voir Dahan Dalmedico, (2005).

6 François-Xavier Le Dimet entretien de recherche.

7 Guri Marchuk (1925 – 2013) est un mathématicien russe, membre du comité central du PCUS (1981), qui fut président de l'académie des sciences de l'URSS de 1986 à 1991. Il faisait partie des amis et interlocuteurs réguliers de JL Lions (Dahan, 2005).

variationnelle, assez simple en soi, que sa mise en œuvre numérique dans des systèmes de grande dimension. C'est la technique des équations adjointes qui a fourni la clé du problème. Cela étant, tout cela était bien loin de l'utilisation des données spatiales dans les modèles de prévision météo. » Techniquement parlant, le problème majeur porte sur le calcul du gradient (qui équivaut à la dérivée ou «*direction de plus forte pente*») d'un modèle de très grande dimension. En effet, Talagrand précise «*Le problème variationnel consiste à trouver les champs météo qui minimisent une distance aux observations. […] On a là une variable de contrôle, en fait des variables numériques, par rapport auxquelles on va minimiser la fonction de manière itérative. À chaque itération, il faut connaître le gradient local de la fonction à minimiser par rapport à la variable de contrôle.* »

Compte tenu de la dimension du problème, le calcul du gradient était jusque-là impossible ; cela bloquait le développement des méthodes variationnelles. Les méthodes du contrôle optimal apportées par Le Dimet, en particulier la technique dite des équations adjointes[8], lèvent ce point de blocage. La rencontre entre Le Dimet et Talagrand aboutit à un article fondamental pour l'assimilation, publié en 1986 dans la revue *Tellus* : «*Variational Algortithms for Analysis and Assimilation of Meteorological Observations : Theoretical Aspects*».[9] Cet article est à l'origine de l'explosion des travaux sur les méthodes variationnelles (Figure 18). En effet, une fois cette première étape franchie, Olivier Talagrand passe immédiatement à l'étude des potentialités opérationnelles de la nouvelle méthode, en collaboration avec un de ses doctorants, Philippe Courtier. Ce dernier effectue sa thèse sur *L'application du contrôle optimal à la prévision numérique en météorologie*. Il la soutient en 1987 devant un jury présidé par JL. Lions. La thèse et les articles qui en découlent (Talagrand & Courtier, 1987 ; Courtier & Talagrand, 1987 ; Courtier & Talagrand, 1990) démontrent l'intérêt et la faisabilité de l'assimilation variationnelle pour la prévision numérique, d'abord avec des modèles simples (à une couche dans les articles de 1987) puis avec un modèle à trois dimensions (1990). L'assimilation de données devient alors un sujet majeur pour la communauté des météorologistes. En juillet 1990, à Clermont-Ferrand, Le Dimet et Talagrand organisent à la demande de l'Organisation météorologique mondiale, le premier colloque international sur l'assimilation de données en météorologie et

8 Il n'est pas question ici d'entrer dans la technique du contrôle optimal et des méthodes adjointes. Le lecteur intéressé se référera à Le Dimet & Talagrand (1986), Talagrand (1997) ; Kalnay (2003) ; Daget (2007) ou, sur les méthodes adjointes, Errico (1996).

9 Plus de 1526 citations selon Google Scholar au 22/9/2016.

océanographie[10]. Comme l'explique Le Dimet : « *Ça correspondait vraiment à une demande [...] parce qu'il y avait ce trou dans la prévision qui faisait que ce n'était pas la peine d'améliorer les modèles si on n'était pas capable de faire mieux dans les conditions initiales* ». Les méthodes variationnelles dépassent les limites de l'interpolation optimale : « *quand vous utilisez du contrôle optimal, vous forcez la condition initiale à être conforme à la physique du modèle. La condition initiale que vous obtenez a vraiment une signification physique* ».

À la recherche des radiances perdues

Il est intéressant de noter que l'assimilation des données spatiales n'est pas la justification première du travail sur les méthodes d'assimilation. Olivier Talagrand est très clair sur ce point : « *le but n'était pas du tout dans mon esprit de fournir une méthode pour assimiler plus commodément les radiances satellitaires. Le but* était d'avoir une approche qui sur le plan conceptu*el et mathématique serait une meilleure solution au problème de l'assimilation ».* La question va toutefois devenir rapidement importante en raison des difficultés persistantes à intégrer les données satellite, outil apparaissant pourtant incontournable pour le développement de la météo. Or « l'*assimilation variationnelle apportait une méthode tout à fait systématique pour introduire dans le processus d'assimilation n'importe quelle source d'information pourvu que l'on sache comment cette information était reliée à ce qui était reconstituée, c'est-à-dire que l'on sache exprimer ce qui était observé comme une fonction de ce qui était représenté, et que l'on soit capable de donner une évaluation de l'incertitude sur l'information* ».

La montée en puissance de cette question se lit dans les actes du colloque de Clermont-Ferrand. Une des deux conférences d'ouverture, faite par Anthony Hollingsworth, alors directeur de la division d'assimilation de données de l'ECMWF, s'intitule : « *Assimilation of Remotely Sensed Atmospheric Data from New Satellite System in the 1990's* ». Il distingue deux approches : « *satellite to model* » basée sur l'interpolation optimale et les « *retrievals* » qui, souligne-t-il : « *certainly works well in the South Hemisphere* » et, compte tenu des limites observées sur l'hémisphère nord, l'approche variationnelle qu'il qualifie de « *model to satellite* » qui devrait donner de meilleurs résultats mais qui indique-t-il : « *has still to be tested in real size problems* ».

La question de l'assimilation des radiances est devenue un axe de recherche

10 Nous tenons à remercier François-Xavier Le Dimet pour nous avoir transmis un exemplaire des actes de ce premier colloque qui réunit toute la communauté des acteurs de la météo concernés par l'assimilation des deux côtés de l'Atlantique (Talagrand, Courtier, Le Dimet, Eyre, Hollingsworth, Pailleux, Sasaki, Derber, Thepaut, Lorenc, Mahfouf,...).

important à l'ECMWF et au Met Office. La logique de ces travaux, pilotés par J. Eyre, est encore de produire des profils de température à insérer dans le modèle (*satellite to model*) mais en utilisant la méthode variationnelle pour l'extraction ce qui permet de maîtriser les incertitudes associées aux données satellite (voir Thépaut & Moll, 1990 ; Eyre & al, 1993). Même si Courtier qualifie l'impact de « *très légèrement positif mais un peu décevant* », ces travaux montrent la faisabilité d'une approche variationnelle et ouvrent la voie au 3D-VAR. Cette dernière méthode rompt avec la logique d'inversion des radiances (*satellite to model*). En effet, en 3D/4D-VAR, on introduit un opérateur d'observation[11] dont le rôle est de « *transformer une quantité (ou variable géophysique) en une quantité directement comparable à une mesure instrumentale* ». Autrement dit cet opérateur permet à partir de variables du modèle, typiquement la température, de générer des radiances qui sont ensuite comparées aux mesures du satellite. Dans le cas qui nous intéresse, l'opérateur d'observation correspond, en première approche, à la fonction de transfert radiatif. La logique des *retrievals* est ainsi abandonnée au profit d'une approche qui va du *modèle vers le satellite*. Comme l'explique Jean Pailleux : « *On va partir de t & q et on va calculer le R « modèle » et on va voir si le R «* modèle *» colle avec le* R « observé ». *Et on le fait coller plus ou moins selon ce qu'on sait du R « observé » qui résulte directement de la physique du rayonnement. C'est presque ce que produit l'instrument radiomètre. [...] on n'a plus besoin d'inverser la fonction de transfert radiatif qui, de toute façon, ne l'est pas.* » Toutes les approximations liées à la procédure de « *retrieval* » sont éliminées et l'information produite par les satellites peut, enfin, être pleinement exploitée.

La longue route jusqu'à l'opérationnalisation

Reste que nous ne sommes là qu'au début de l'histoire. La route est encore très longue jusqu'à la mise en œuvre opérationnelle de la méthode. Plusieurs difficultés sont ainsi identifiables (et identifiées) qui constituent autant d'obstacles à franchir :

- La mise en œuvre des techniques du contrôle optimal sur des systèmes aussi complexes que les modèles de prévision numérique du temps n'est pas triviale. Il ne s'agit aucunement d'un simple transfert de techniques mises au point ailleurs. Comme l'explique Le Dimet : « *les méthodes étaient très connues sur des problèmes linéaires. Très très peu de gens avaient regardé pour des problèmes non linéaires. Et, personne sur le*

11 H dans la fonction de coût de la figure 16.

contrôle des conditions initiales. […] j'avais été très encouragé par Lions à utiliser les techniques de contrôle dans ce contexte. Mais je ne pense pas qu'il soupçonnait les problèmes de calcul qu'il y avait derrière. Nous non plus d'ailleurs. ».

- La possibilité de mise en œuvre de la méthode est, comme c'est toujours le cas en météorologie, étroitement liée à l'évolution de la puissance des calculateurs. Le problème est d'autant plus compliqué que la méthode variationnelle, en particulier dans sa forme 4D est très coûteuse en temps de calcul car la fonction de coût à minimiser intègre le modèle lui-même qui, par conséquent, doit tourner à chaque nouvelle itération. «*En 1982 c'était absolument impossible. […] Sans évolution du calcul, ces méthodes n'avaient pas de sens. On ne peut pas isoler les méthodes de la perspective de l'évolution des moyens de calcul. Sans la puissance de calcul c'était une très mauvaise idée*». Il va donc être nécessaire de développer des méthodes pour *réaliser les calculs dans les délais extrêmement courts de la* prévision numérique du temps et de coordonner la mise en œuvre avec l'évolution des calculateurs. Difficulté supplémentaire, dans le même temps, le modèle de prévision évolue lui aussi et consomme le temps de calcul disponible, ce qui fait que l'on est toujours à la limite des performances des calculateurs.
- Reste enfin l'énorme travail de mise en place dans des systèmes opérationnels avec ce que cela suppose de codage, validation, débogage, contrôle de la qualité des données, etc. mais aussi conviction des opposants, comme nous le verrons. Olivier Talagrand est extrêmement clair sur la difficulté qu'il y a à insérer une nouvelle approche dans un système opérationnel existant : «*Les modèles météo sont, étaient déjà à l'époque, des machines immenses, des logiciels qui ont une très grande inertie.* [En plus] *il y avait un problème tout à fait spécifique c'est qu'il fallait en développer l'adjoint. Or écrire le code adjoint, c'est mathématiquement univoque. Il fallait prendre l'adjoint d'un code existant. L*à, *nous nous sommes trouvés face à un problème technique auquel apparemment les gens de l'école de Lions n'avaient jamais été confrontés. Quand ils utilisaient la méthode adjointe, il n'y avait pas un modèle numérique préexistant. Il y avait un problème et au niveau des codes, ils écrivaient simultanément le modèle direct et l'adjoint. Jamais personne ne s'était trouvé devant un énorme code dont il fallait prendre l'adjoint.* »

On comprend mieux dès lors, la boutade de François-Xavier Le Dimet riant : «*Si j'avais su* [en 1982-83] *ce que ça coûtait* [en capacité de calcul] *j'aurais abandonné tout de suite* […] *On ne soupçonnait pas les difficultés qu'il y avait* [dans la mise en œuvre opérationnelle] ».

✷ LA MISE EN ŒUVRE OPÉRATIONNELLE : LE PROJET IFS/ARPEGE À L'ECMWF ET MÉTÉO FRANCE

Ces travaux fondamentaux ouvrent une nouvelle voie pour l'assimilation de données, mais restent essentiellement théoriques. Mais, comme dans tout processus d'innovation, un monde sépare la démonstration de l'intérêt de la méthode et sa mise en œuvre opérationnelle. Ce dont témoigne Olivier Talagrand : « *une méthode marche, est mathématiquement bien fondée, on a montré sur un modèle simple qu'elle donne des résultats mais pour autant cela prend un certain temps de la développer dans un modèle météo complet… la quantité de travail qui a été nécessaire pour adapter le modèle du Centre européen à la mise en œuvre opérationnelle de l'assimilation variationnelle se compte en milliers d'heures-hommes de travail, en dizaine de milliers… C'est une tâche qui dépasserait complètement non seulement les possibilités d'un individu mais d'un petit groupe de recherche avec trois chercheurs et deux programmeurs* ». *Jean-Noël Thépaut*[12] *le confirme : « c'était un chantier gigantesque ; il fallait tout développer : les modèles adjoints, les modèles linéaires tangents et, en parallèle, commencer à s'intéresser aux données satellite qui étaient une des justifications de l'approche variationnelle* ».

Le projet IFS/ARPEGE : « Il faut imaginer la sueur et les larmes pendant ces longues années » *Jean-Noël Thépaut*

La tâche et les enjeux sont tels qu'un projet commun à l'ECMWF et Météo-France est décidé et lancé formellement en octobre 1988, lors d'une réunion commune à Reading. Le codage du nouveau modèle de prévision par Philippe Courtier et Mats Hamrud a en fait déjà débuté dès juillet 1987. C'est l'un des plus gros projets jamais entrepris par le Centre[13] et une décision « *très risquée* ». Comme l'explique Jean-Noël Thépaut : « *il fallait être un peu visionnaire parce que quand Talagrand et Courtier ont sorti leur papier avec le shallow water, les moyens de calculs pour extrapoler un système d'équations primitives à haute résolution n'existaient pas ; il fallait quand même être assez courageux pour anticiper les moyens de calculs qui se-*

---

12 Ingénieur de la météo, Jean-Noël Thépaut a commencé sa thèse en 1988 (soutenue en 1992) à l'ECMWF sous la direction de Philippe Courtier et Olivier Talagrand. Il a -joué un rôle très important dans la mise en œuvre du 4D-VAR à l'ECMWF puis à Météo France.

13 « *One of ECMWF's biggest-ever projects was the development of the variational data assimilation system* ». (Andersson & Thépaut, ECMWF Newsletter, n°115, 2008).

raient disponibles parce qu'on multipliait le temps de calcul par rapport à l'interpolation optimale de manière colossale. » Pour Philippe Courtier, au moment où Dave Burridge, Directeur de l'ECMWF, prend la décision de lancer le projet : « *la faisabilité du 4D-VAR n'est pas acquise pour deux raisons. D'une part, la faisabilité scientifique ne l'est pas car il y a des phénomènes non différentiables comme les précipitations. Deuxième raison : on ne savait pas si on aurait le temps de calcul nécessaire. Beaucoup de gens disaient que ce ne serait pas faisable, qu'il y aurait toujours un déficit en puissance de calcul. Les nouvelles machines arriveraient mais la résolution du modèle ayant augmenté, le 4D-VAR demeurerait toujours en limite. En admettant que l'on fasse trente itérations de minimisation, le 4D-VAR coûtera cent fois le prix d'une prévision à 24 h. Il faut être capable pendant cette phase de minimisation de faire cent prévisions à 24 h.* ».

Tout le monde n'est donc pas convaincu par l'assimilation variationnelle. Certains des concepteurs des méthodes d'interpolation optimales restent sceptiques sur la faisabilité du 4D-VAR. Ils sont convaincus que l'interpolation optimale pourra résoudre les problèmes rencontrés. Philippe Courtier rappelle qu'en 1988, malgré le lancement d'IFS/ARPEGE et en raison des incertitudes associées au 4D-VAR, Météo France avait décidé de recoder un processus d'interpolation optimale.

Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances du projet IFS/ARPEGE se référera à Andersson et Thépaut (2008) ou, aux travaux plus récents de Pailleux et al. (2015). La *figure 6* rappelle les grandes étapes du projet.

- IFS/ARPEGE development started in july of 1987.
- October 1988 : official kick-off for IFS/ARPEGE. Completion scheduled for 1993 for 4D-VAR.
- 1991 : new completion date scheduled for 1995/1996 due to 4D-Var's huge hunger for computing power as well as the need for further software, science and algorithmic developments.
- The IFS model was introduced on march 2, 1994 (Cy11r7) on the Cray C90 computer
- 1996 : 3D-VAR became operational on january 30, 1996 (Cy14r3). Decision not to migrate OI to the new Fujitsu VPP 700.
- 3D-VAR was migrated from CRAY (shared memory) to Fujitsu VPP 700 (distributed memory) on september, 19 1996 (Cy15r5)
- 1997 : 3D-VAR became operational at Météo-France ; 4D-VAR became operational at ECMWF on november 25 (Cy18r1)
- 1999 : 4D-VAR became operational at Météo-France on june 20.

Figure 6 – Les grandes dates du projet IFS/ARPEGE (d'après Andersson & Thépaut, 2008)

Nous insisterons sur l'ampleur du travail visant à introduire dans un système opérationnel une nouvelle méthode d'assimilation de données, en rupture complète avec le *dominant design*. Andersson et Thépaut (2008) indiquent ainsi les éléments à concevoir pour mettre en place un système de 4D-VAR opérationnel *(figure 7)*. Trois facteurs expliquent l'ampleur d'une tâche qui a mobilisé environ dix personnes en équivalent temps plein pendant dix ans : le recodage du modèle de prévision, le développement de la méthode incrémentale afin de réduire les coûts de calculs et, enfin, le réglage de B, la matrice des covariances d'erreur d'ébauche.

- A forecast model and its adjoint.
- The observation operators linking the observed variables to the model quantities; code to compute the observation cost function J_o and its gradient.
- The first-guess operator, to incorporate information from recent analyses; code to compute the first-guess cost function J_b and its gradient.
- Balance operators to ensure the appropriate relationship between mass and wind.
- General minimisation algorithm, to seek the analysis as the minimum of the cost function J_o+J_b.
- A suitable solution algorithm that can take advantage of the computing power available on multi-processor computing platforms.

Figure 7 – Les composants d'un système 4D-VAR (d'après Andersson & Thépaut, 2008)

Premier facteur : le recodage du modèle de prévision

La première difficulté fut celle du développement d'un nouveau modèle de prévision afin d'en obtenir l'adjoint[14]. Talagrand rappelle les éléments de la situation : «*Jamais personne ne s'était trouvé devant un énorme code dont il fallait prendre l'adjoint. La difficulté tient au fait qu'il faut procéder à rebours. Or les codes météos sont écrits de telle sorte qu'ils comportent des systèmes de branchement, de type «if», qui empêchent de remonter. Dans ce cas, il faut entièrement réécrire le code de telle façon qu'on puisse le remonter…*

14 Rappelons que l'adjoint est un modèle mathématique dépendant du modèle direct et indispensable dans le calcul.

Lorsque Philippe Courtier est allé à l'ECMWF pour mettre en œuvre le VAR, après avoir étudié le problème et en avoir discuté avec les collègues, ils ont décidé que c'était une excellente occasion de réécrire le code du modèle en entier. […] et de développer son adjoint en même temps. Cette simultanéité n'accroît le travail que de 10 ou 15 % alors que développer un adjoint pour un code existant représente un travail monstrueux. De plus, c'était l'occasion de faire des modifications. Cet énorme travail de réécriture du code a été réalisé avec Météo France ».

Ce travail initié par Philippe Courtier et Mats Hamrud à l'été 1987 prendra deux ans et suspendra les travaux sur l'assimilation proprement dite, car, comme l'explique Courtier les questions étaient étroitement liées : « *on avait besoin de recoder le modèle pour en déduire le linéaire tangent et l'adjoint afin de faire la recherche en assimilation. Pour faire la recherche, il fallait déjà avoir codé une bonne partie de ce qui serait le nouveau modèle. Ce fut l'objet de deux thèses, celle de Jean-Noël Thépaut et celle de Florence Rabier* ». Pour fonctionner, l'assimilation variationnelle suppose de déterminer – via la méthode adjointe – le gradient de la fonction de coût. Si le travail est limité sur des modèles simplifiés, il en va différemment sur un modèle opérationnel et cela exige un recodage. De surcroît, dans un souci de pérenniser le modèle, l'équipe saisit cette opportunité pour repenser la logique de son codage.
Ce travail de codage, dans le cas d'IFS/ARPEGE, suppose des ruptures conceptuelles importantes et mobilise les scientifiques eux-mêmes. Comme le précise Philippe Courtier : « *les méthodes numériques utilisées dépendent de la physique du modèle* » ; il faut connaître la physique du modèle « *sinon on ne réussit pas le* débog*age* ». La très grande dimension du problème et la non-linéarité de nombreux opérateurs débouchent sur le développement d'une méthode innovante de codage dite « ligne à ligne ». Elle permet de développer l'adjoint du modèle de prévision, y compris avec des opérateurs non linéaires, et « *d'avoir le gradient d'un problème à grande dimension* ». L'architecture du modèle est repensée afin d'accroître sa résistance aux évolutions futures du code et des calculateurs. Ceci explique sans doute qu'il ait survécu et fonctionne toujours, vingt-cinq ans après. Les inévitables opérations de débogage, contrôle qualité… sont également de grandes consommatrices de ressources. Philippe Courtier prend l'exemple du changement de calculateur : « *j'avais dû mobiliser un grand nombre de ressources pour repenser et reconcevoir complètement la chaîne d'observation et de prétraitement des observations* ; *ce sont des ressources monopolisées par des questions purement techniques* ». Une première version du

code est disponible fin 1989. Dans la continuité, le travail sur l'assimilation variationnelle reprend. La robustesse et la flexibilité de cette méthode, expliquent certainement sa permanence à l'ECMWF et à Météo-France (voir Pailleux & al, 2015).

Deuxième facteur : le développement d'une méthode incrémentale pour réduire les temps de calcul

L'autre énorme difficulté du projet IFS/ARPEGE concerne les coûts de calcul de la méthode variationnelle. Comme l'explique Andersson et Thépaut : « *The computing cost of 4D-Var was always a concern. It became clear that it would be prohibitively expensive, even taking into account the planned computer upgrade in 1996, to solve the full system. It was clear that significant cost-saving devices had to be developed* »[15]. Le problème provient de la minimisation de la fonction de coût qui mesure la distance du modèle aux observations. Cette fonction parce qu'elle intègre le modèle de prévision lui-même, fait exploser les coûts de calcul. Cette question cristallise les débats sur la faisabilité des méthodes variationnelles, notamment sur le 4D-VAR qui impose que cette minimisation soit réalisée sur une fenêtre de quelques heures afin que la prévision soit prête dans les délais exigés par le système de production de la prévision.

La rupture conceptuelle qui résoudra cette difficulté, est esquissée au cours d'une discussion à bâtons rompus dont témoignent Philippe Courtier et Jean-Noël Thépaut.

« John Derber de la NOAA a suggéré *d'approximer le problème non linéaire par un problème quadratique [...] ça a des avantages en termes de minimisation et surtout ça résout le problème de non-différentiabilité [...] J'étais avec Thépaut et Parish, nous étions quatre dans son bureau. C'était une conversation à bâtons rompus comme on peut avoir entre scientifiques. De retour au Centre européen, j'ai repris l'idée pour le faire à plus basse résolution afin de résoudre le temps de calcul ; je cherchais à parvenir à un compromis. On a fait des tests et, cela marchait* ». Courtier, Thépaut et Hollingsworth publient cette méthode dite « *incrémentale* » en 1994[16]. Schématiquement, les itérations nécessaires à la minimisation de la fonction de coût sont réalisées sur une version simplifiée, avec une maille plus large, du modèle de prévision. « *Une fois toutes les trente minimisations* », le modèle complet

15 (ECMWF newsletter n°115, 2008, p.9).

16 « A Strategy for Operational Implementation of 4d-Var, Using an Incremental Approach. » *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 1994, vol. 120, pp. 1367-87.

est utilisé afin de recaler l'algorithme de minimisation. Cette approximation dégrade la qualité mais résou*t de « façon raisonnable »* le problème du coût de calcul. [...] « *on gagne à peu près un ordre de grandeur en temps de calcul* ». Le verrou du temps de calcul de l'assimilation variationnelle est levé et comme le rappelle Jean-Noël Thépaut : « *le 4D-VAR qui restait aspirationnel est devenu réalisable avec cette technique incrémentale dans laquelle la grille d'analyse est plus large que la grille du modèle. Avec ces simplifications, on a fait rentrer le 4D-VAR sur le calculateur du Centre européen* ».

Troisième facteur : le réglage de B, matrice des covariances d'erreur d'ébauche ou Dieu gît dans les détails.

Reste que, malgré tous ces efforts, l'équipe IFS/ARPEGE n'était pas encore au bout de ses surprises, en particulier en ce qui concerne l'assimilation des donnés satellite. Lorsqu'en 1992, Philippe Courtier revient à l'ECMWF après un passage à Météo-France, le modèle a été recodé, la méthode incrémentale est en cours d'élaboration et l'on progresse vers la mise en œuvre opérationnelle du 3D-VAR. L'intégration des radiances constitue alors un enjeu important du projet. Et pourtant, contrairement à toutes les attentes, l'assimilation *des observations satellite* dans le nouveau système variationnel n'a « *pas d'impact réellement positif.* »

Ce sont les fonctions de structures contenues dans la matrice des covariances d'erreur d'ébauche, dite matrice B (voir figure 16) qui expliqueront ce résultat. Jean-Noël Thépaut rappelle son rôle fondamental. Ces fonctions de structure donnent un poids aux informations les unes par rapport aux autres : *« C'est le poids donné à ce qui vient du passé et qui est caractérisé par la prévision à court terme. En l'absence d'observation nouvelle, il reste cette prévision, et ses erreurs, caractérisée par cette matrice B. Cette matrice B est fondamentale car lorsqu'on rajoute une observation, le poids qu'on donne à l'information a priori détermine à quel point la nouvelle information peut modifier l'état initial localement, et dans son voisinage. Chaque point est corrélé. Ça paraît relativement simple mais la science dans ces corrélations est fondamentale*[17]*. Il faut qu'une modification de température ait un sens en termes de circulation à l'entour. Il faut des cross-covariances entre la température... [et les autres paramètres], des corrélations temporelles. [...]. Par exemple en assimilant des données d'avion à 200 mb on arrive à avoir des modifications de l'état initial qui descendent comme ça [des-*

17 Souligné par l'auteur.

sine un orage en diagonale] et c'est typique d'une perturbation barocline, entre ce qui se passe à 200 mb et ce qui se passe au sol c'est « tilté » comme ça, c'est la circulation. Et bien pour être capable de reporter ça en termes de modifications de l'état initial grâce à une observation qui se trouve ici, c'est ça les fonctions de structures, et ça c'est B. »

En 1993-1994, l'absence d'impact des radiances est liée au réglage de cette matrice B complexe qui condense les connaissances des météorologistes sur la prévision[18]. Philippe Courtier a alors l'intuition que le problème vient de B. Pendant qu'il travaille sur sa thèse, il s'occupe encore d'interpolation optimale dans le cadre de ses responsabilités opérationnelles. Il repère alors la source du problème : « je ne sais pas pourquoi j'ai *eu l'intuition de ce qui se passait. [...] on est dans du technique, on avait utilisé des fonctions de corrélation dans lesquelles on avait séparé les corrélations horizontales avec la verticale... Et dans le réglage en 1986 ou 1985 fait par T. Hollingsworth et P. Lönnberg... ils avaient réglé vers la meilleure utilisation possible des AIREP, des données de vent qu'on a à peu près à 300 mb grâce aux avions qui traversent l'Atlantique (ou le Pacifique). Ils avaient réglé vers cela ; du coup, on utilisait moins bien l'info de température. Je peux écrire la raison mais il faut faire de la physique, c'est lié à l'équilibre géostrophique. J'ai compris que les fonctions de corrélation qu'on utilisait filtraient et ne retiraient rien de l'information fournie sur la verticale par les radiances. Avec les instruments de l'époque, on avait deux éléments d'information dans les dix premiers kilomètres. Cela expliquait pourquoi l'impact du 1D-VAR et du 3D-VAR était demeuré marginal. On ne récupérait pas l'information de température présente dans les radiances. Dans cette réunion, j'ai proposé d'utiliser des fonctions de structure qui sont non séparables et de les régler pour avoir à la fois ce qui concerne le vent et l'information de température sur la verticale. Cela a marché. [...] et a débloqué l'utilisation des radiances, des radiances de l'époque. [...] Bien sûr, il y avait d'autres problèmes dans le 3D-VAR à ce moment-là. L'approximation favorisait le vent car les données étaient de bonne qualité et très précieuses, du coup on n'extrayait pas d'information de température des radiances. »*

Cette longue citation illustre à elle seule l'extraordinaire complexité de l'intégration d'une nouvelle donnée dans un système opérationnel qui fonctionne depuis une décennie sur d'autres bases théoriques et, en corollaire, le degré de précision des connaissances nécessaires pour le faire évoluer.

---

18 « *The forecast error covariance **B** is the most difficult error covariance to estimate, and has a crucial impact on the results* » (Kalnay, 2003, p. 161).

Elle montre le chemin à parcourir pour passer d'un nouveau concept de traitement de la donnée, l'assimilation variationnelle, à la réalisation effective des promesses qu'il contient dans un système opérationnel. *Dieu gît vraiment dans les détails.*

La compréhension des processus à l'œuvre et l'identification des points bloquants requièrent une vigilance constante sous peine de voir le projet échouer. Le basculement vers le 3D-VAR aura finalement lieu opérationnellement à l'ECMWF en janvier 1996 (Courtier & al, 1998) suivi en novembre 1997 par le 4D-VAR[19] C'est aussi en 1998 qu'est démontré l'impact positif de l'assimilation directe des radiances pour la qualité de la prévision dans l'hémisphère nord. Dix-sept années se seront écoulées depuis la production par la NOAA des premiers pseudo-sondages opérationnels issus des sondeurs atmosphériques (SATEM, 1978)[20].

---

19 Basculement au 3D-VAR à Météo-France en 1997 et basculement au 4D-VAR à Météo France en 1999, à l'UK Met Office en 2004, au Japan Meteorological Agency et à l'Environment Canada en 2005 suivi par l' US Naval Research Laboratory en 2009.

20 Une des forces de l'assimilation variationnelle réside dans son caractère génératif. En effet, une fois mise en place, la méthode s'est révélée extraordinairement efficace pour :
1) intégrer une grande variété de données météorologiques. Ce fut le cas, par exemple, pour assimiler les données satellitaires dites de GPS/RO (pour Radio-Occultation) entre 2006 et 2010 (voir https ://en.wikipedia.org/wiki/GNSS_radio_occultation) ;
2) traiter la question de l'assimilation dans d'autres domaines que la météorologie, typiquement l'océanographie ou l'hydrologie, mais aussi la médecine, l'agronomie, l'urbanisme, etc.
Comme l'explique FX Le Dimet, la technique constitue en effet une réponse possible à une question générique : « *comment coupler de l'information hétérogène en nature* » ?

Références

– S. Lenfle, « De la valeur des données spatiales : le cas de l'assimilation des radiances en prévision numérique du temps », Rapport de recherche CRG – CNES, octobre 2015.

– S. Lenfle, « L'innovation dans les télécommunications spatiales : gérer des domaines d'innovation et des « projets étranges » ». Rapport de recherche CRG – CNES, février 2014.

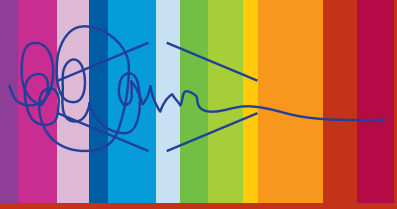
– S. Lenfle & C. Midler, « Explorer les applications du spatial : le CNES face à l'émergence des services climatiques ». Rapport de recherche CRG – CNES, Novembre 2012.

– S. Lenfle & C. Midler, « Explorer les applications du spatial : Le cas de l'observation civile de la terre ». Rapport de recherche CRG – CNES, octobre 2011

– Le Pellec-Dairon, M. (2013) *Stratégie d'évaluation et de pilotage de la valeur des projets innovants. Le cas de la valeur environnementale des programmes spatiaux*, Thèse de Doctorat en Gestion, École Polytechnique, 29 novembre 2013 (sous la direction de S. Lenfle et C. Midler).

– Ostrom, E. 2010. « Beyond Markets and States : Polycentric Governance of Complex Economic Systems. » *American Economic Review*, 100 (3), pp. 641-72.

____. 1990. *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge : Cambridge University Press



Ce schéma créé par Mathias Béjean synthétise en trois formes les caractéristiques principales des modèles d'organisation des activités d'innovation qui ont émergé à la fin du XXe siècle. L'« arc-en-ciel » traduit la multiplicité des problèmes auxquels l'équipe se confronte. Les lignes épaisses, extérieures, divergentes puis convergentes qui forment un « diamant » rappellent la nécessité d'un cadrage global des activités et l'importance équivalente de la créativité (divergence) et de la recherche de solutions optimales (convergence). Le « tourbillon » illustre les cheminements apparemment désordonnés que suit l'équipe avant de retrouver en phase de convergence la ligne droite emblématique de la gestion de projet.
CRÉDIT : MATHIAS BÉJEAN

Ce cahier n°2, coordonné par Michel Avignon et Cathy Dubois,

présente les travaux de recherche réalisés depuis 2009 par Mathias Béjean et Sylvain Lenfle sur les processus d'innovation au CNES.

Il s'inscrit dans la continuité du cahier n°1 « Valeurs du spatial pour la société » paru en 2013, qui rendait compte du travail d'un collectif d'ingénieurs du CNES et de chercheurs réunis à l'initiative de Philippe Escudier afin de répondre à la demande « d'indicateurs » susceptibles de mesurer les apports du spatial, sa valeur.

Ces cahiers participent à la diffusion de la réflexion sur l'innovation initiée lors des rencontres managériales de mai 2008 et poursuivie dans le cadre du programme de recherche « Espace, innovation, société ».