

# **IMPACT DES ACTIVITES FUTURES D'ARIANE V SUR L'ENVIRONNEMENT HUMAIN ET NATUREL**



## **RAPPORT FINAL**

**Coordination générale : Marc Lointier (IRD)**

**Président du groupe d'experts : Alain Pavé (CNRS)**

**Experts :**

**Patrick Andrieux, INRA  
Marie Paule Bonnet, CNRS  
Michel Cavallès, BRL  
Guillaume Fabre, BRL  
Jean Marie Fotsing, Univ. Orléans  
Jean Pierre Garrec, INRA  
Catherine Grimaldi, INRA**

**Yves Lévi, Univ. Paris Sud  
Bernard de Mérona, IRD  
Laurent Polidori, IRD  
Daniel Sabatier, IRD  
Claudine Schmidt-Lainé, CNRS  
Olivier Tostain, ECOBIOS**

## AVANT PROPOS

Ce document a été réalisé à la demande du Centre Spatial de Guyane. Il reflète un souci d'évaluation des risques environnementaux et sanitaires liés à la multiplication des vols du lanceur Ariane 5. Ce travail se situe dans la suite d'études antérieures et a pour objectif de proposer un dispositif opérationnel de suivi des effets des pollutions.

Le groupe d'expert, majoritairement constitué de scientifiques reconnus, ne s'est pas limité à l'exposé de situations factuelles et à donner des réponses rapides, mais a fait un effort conceptuel avant de proposer une mise en œuvre pratique. Cet effort s'est traduit par un temps de réalisation un peu plus long que prévu, mais restant dans les limites du raisonnable et, en tout cas, d'une durée supplémentaire négligeable par rapport à l'étalement dans le temps de la succession des lancements, c'est-à-dire de la « durée de vie » du lanceur Ariane 5, que nous espérons la plus longue possible. Nous espérons aussi avoir fait œuvre méthodologique en proposant une approche que nous pensons transposable à d'autres situations (autres lanceurs, autres situations « industrielles »).

Le document a été structuré de façon à permettre une lecture la plus aisée possible :

1. Présentation du modèle conceptuel de la pollution, conçu en fonction d'objectifs opérationnels,
2. Passage du conceptuel à l'opérationnel,
3. Proposition d'un système opérationnel de suivi des pollutions.

Les arguments précis et des analyses complémentaires, auxquels on pourra se reporter, sont présentés en annexe. Plus que des références, ce sont de véritables documents de travail.

Concrètement, nous insistons sur la nécessité :

- d'un large recours à la modélisation, dans certains cas le modèle pouvant même être plus fiable que des mesures *in situ*,
- de faire des études plus précises sur la composition chimique des retombées,
- de concevoir des sites pilotes pour le suivi des effets de la pollution tout en assurant une surveillance plus globale de l'évolution de l'environnement,
- de ne pas sous estimer les aspects humains : si les risques sanitaires sont très faibles, il ne faut pas négliger la perception que les populations locales peuvent avoir de ces pollutions et les conséquences de ces perceptions.

Je tiens à remercier l'ensemble des experts pour le travail fourni, pour la qualité de nos débats et pour l'excellente ambiance de nos réunions et de nos rencontres « annexes ». Le Centre spatial guyanais nous a fourni les meilleures conditions possibles pour l'élaboration de ce rapport et surtout un sujet d'étude passionnant. Je tiens enfin à souligner la qualité du dialogue que nous avons établi avec nos interlocuteurs du CSG.

*Alain Pavé*  
*Le 14 janvier 2003*

## SOMMAIRE

### ATTENDUS

#### I. RETOMBÉES DU LANCEUR ARIANE 5 ET LEURS CONSÉQUENCES - UN MODÈLE

##### CONCEPTUEL POUR L'OPÉRATIONNEL - ..... 4

I.1. CLASSIFICATION DES POLLUTIONS D'ORIGINE INDUSTRIELLE : L'ORIGINALITÉ DU CAS D'ARIANE 5..... 4

I.2. ANALYSE SYSTÉMIQUE DU PROBLÈME ..... 5

*I.2.1. L'atmosphère ..... 6*

*I.2.2. L'interface atmosphère-surface ..... 6*

*I.2.3. Surface et sub-surface ..... 7*

*I.2.4. Le sol profond et l'interaction avec le socle ..... 7*

#### II. DU FONCTIONNEL A L'OPÉRATIONNEL : RECHERCHE D'INDICATEURS..... 8

II.1. CARACTÉRISTIQUES DES INDICATEURS ..... 9

II.2. PARTICULARITÉS DU MILIEU IMPACTÉ..... 9

II.3. PARTICULARITÉS DES RETOMBÉES..... 10

II.4. TYPES D'INDICATEURS ENVISAGEABLES..... 10

#### III. SYSTÈME OPÉRATIONNEL DE SUIVI DES RETOMBÉES ET DE LEURS CONSÉQUENCES.. 11

III.1. LE DISPOSITIF ACTUEL ..... 11

III.2. ÉTUDE « CRITIQUE » DU DISPOSITIF ACTUEL ..... 11

III.3. UNE APPROCHE INTÉGRÉE ET INTERDISCIPLINAIRE ..... 12

III.4. DESCRIPTION DU DISPOSITIF OPÉRATIONNEL ..... 12

*III.4.1. Le dispositif pour les processus rapides ..... 12*

*III.4.2. Le dispositif pour des échelles moyennes : des sites pilotes..... 13*

*III.4.3. L'environnement..... 14*

*III.4.4. Les populations humaines ..... 15*

*III.4.5. Les aspects méthodologiques : bases de données et modélisation ..... 15*

*III.4.6. Les pollutions dues au lanceur Ariane 5 : un cas d'école..... 16*

#### IV. RECOMMANDATIONS ET PRIORITÉS ..... 16

# Impact des activités futures d'ARIANE V sur l'environnement humain et naturel

## Attendus

Les premières réflexions sur les impacts environnementaux des activités industrielles en Guyane ont commencé avec l'époque dite des "grands chantiers" et leur planification dans les années 1985-1990. Durant cette période, les différents Instituts de Recherche ont mis leurs compétences et leurs connaissances environnementales au service d'études scientifiques destinées à la compréhension de ces impacts industriels. A cette époque, le questionnement des industriels était organisé sur la base d'un postulat selon lequel il existait une connaissance suffisante de l'environnement tropical guyanais disponible auprès des Instituts de Recherche. Or, si ce postulat était tout à fait réel en matière de connaissance et de description scientifique des milieux naturels, peu d'études avaient été consacrées à l'analyse d'impact d'activités industrielles, c'est-à-dire à l'élaboration d'une connaissance spécifique, répondant à un problème particulier. Les études d'impact proposées par les scientifiques ont donc été l'occasion de faire évoluer leurs méthodes de travail, intégrant notamment les Données d'Observation de la Terre (DOT) en proposant, d'emblée, un « raisonnement spatial » afin de mieux maîtriser l'intégration de connaissances scientifiques diverses.

S'appuyant sur ces constats, il est aujourd'hui nécessaire d'élaborer et d'utiliser des méthodes permettant de répondre de manière intégrée à des questions relevant de domaines jusqu'alors déconnectés, comme l'environnement naturel et la santé publique par exemple. Il faut également s'adapter aux évolutions de la législation en matière d'environnement, de santé publique, aux normes en matière de communication de l'information environnementale et à l'évolution de la perception sociale. Le déphasage évoqué plus haut entre l'adéquation de la connaissance scientifique et les besoins d'une étude d'impact sont désormais très atténués. Il est nécessaire d'entamer un nouveau processus visant à faire évoluer la connaissance pour mieux l'adapter au suivi de ces impacts sur l'environnement et d'une manière générale aux besoins de la société, par ce que l'on peut aujourd'hui nommer l'ingénierie des systèmes écologiques (cf. encart p. 18).

Le Centre Spatial Guyanais (CSG) a souhaité réaliser une opération de prospective sur les impacts à long terme des lancements d'Ariane V sur le milieu naturel et humain, dès les premiers lancements opérationnels. Pour ce qui concerne les milieux naturels, la mise en place d'indicateurs ou de procédés d'évaluation des impacts relève complètement de l'ingénierie des systèmes écologiques

Dans le cadre qui vient d'être exposé, un groupe d'experts a été constitué et a proposé de réaliser les actions suivantes :

- Proposer une synthèse des acquis et des connaissances à partir des études antérieures, menées depuis une dizaine d'années sur le site du CSG<sup>1</sup>
- Proposer une méthodologie originale s'appuyant sur les sciences des technologies de l'information et de la communication, ciblée sur une approche spatialisée utilisant les DOT et les systèmes d'information géographique (SIG)
- Analyser les moyens de modélisation et les contraintes opérationnelles pour une simulation de 50 lancements d'Ariane V
- Dégager une méthode d'étude générique pour aborder les transformations du milieu tropical, maillon essentiel de réponse à de nouveaux objectifs en amont des processus de gestion du milieu
- Faire des recommandations pour ce suivi à long terme en recherchant des indicateurs opérationnels d'impact sur l'environnement.

La démarche et leurs conclusions sont exposées ci-après.

---

<sup>1</sup> Fotsing J.M. , Huaman D., mai 2002, rapport produit dans le cadre de cette convention

# **I. Retombées du lanceur Ariane 5 et leurs conséquences - Un modèle conceptuel pour l'opérationnel -**

Le lanceur Ariane 5, lors d'un tir, rejette dans la basse atmosphère des produits qui résultent de la combustion des propergols des propulseurs auxiliaires à poudre. Les deux principales catégories de produits sont des composés chlorés et aluminiques et en grande majorité l'acide chlorhydrique (HCl) et l'alumine ( $Al_2O_3$ )<sup>2</sup>, cependant en l'absence d'une étude précise du transport atmosphérique et de la chimie associée, on ne peut exclure que des produits chlorés, azotés et aluminés, néosynthétisés et non encore identifiés, retombent. Mais indépendamment de cette connaissance plus précise qu'il y a lieu d'obtenir, on peut analyser a priori les principales dimensions du problème, de la sortie des tuyères à leurs conséquences possibles sur le milieu, en passant par les transferts, les transports et les transformations dans les différentes phases : atmosphériques, biosphériques, hydrologiques et pédologiques.

Nous nous plaçons donc dans une démarche de type déductive, maintenant possible sur la base des connaissances acquises et surtout grâce à la méthode d'approche choisie pour ce problème : l'analyse systémique et la modélisation, qui lui est habituellement associée.

Enfin, soulignons dès à présent, qu'outre l'importance du suivi des pollutions et de ses effets pour l'opérationnel, le cas présenté par le lanceur Ariane 5 présente de nombreux intérêts, comme prototype, comme « modèle », de pollution d'origine industrielle. Intérêt pour la recherche sur ce type de perturbations, intérêt par le milieu dans lequel elle se produit<sup>3</sup>, intérêt par l'image pour le lanceur lui-même, comme instrument d'étude de ces pollutions et surtout pour la méthodologie à promouvoir et à développer pour ces études.

## **I.1. Classification des pollutions d'origine industrielle : l'originalité du cas d'Ariane 5**

Si l'on prend comme référence l'INERIS, dont la fonction principale est l'étude des risques sanitaires et environnementaux d'origine industrielle ou conséquences de l'activité industrielle, ces risques ont deux origines :

- accidentels, dont les pollutions résultant d'accidents majeurs industriels (explosions et/ou relargage brutal de grandes quantités de polluants). Les risques sont relatifs aux impacts physiques, en cas d'explosion, et aux effets chimiques et biologiques, dus aux produits. Les effets physiques sont instantanés, les effets de la pollution sont en général très rapides et s'atténuent au cours du temps (processus de type plus ou moins exponentiel décroissant) ;
- chroniques ou diffus (pour les pollutions, il s'agit de rejets réguliers de polluants, le plus souvent en faible débit...). Les effets sont chimiques sur les milieux et surtout biologiques (effets toxiques sur l'homme et les autres systèmes vivants) Ces effets sont souvent cumulatifs et augmentent au cours du temps ; leur détection peut ne pas être immédiate et n'être effective que sur le long terme. D'où l'importance de les anticiper, et d'en imaginer les conséquences pour pallier au mieux ces conséquences.

Le cas des pollutions dues au lanceur Ariane 5 est « original » dans la mesure où il relève de ces deux grandes catégories, même si l'on exclut l'explosion du lanceur qu'on peut assimiler, du moins l'espérons nous, à un événement rare et qui n'est pas considéré ici.

---

<sup>2</sup> On notera que la toxicité et l'écotoxicité de ces produits sont bien plus faibles que celles de composés organiques d'autres propergols ou comme les pesticides. Cependant, d'autres molécules synthétisées pendant la phase atmosphérique de la pollution pourraient se révéler plus dangereuses. C'est pourquoi il y a lieu de faire une étude précise de la chimie de cette phase atmosphérique, la seule sur laquelle on ne peut rien dire de précis dans l'état actuel des connaissances.

<sup>3</sup> On peut prévoir que les milieux tropicaux humides, notamment amazoniens, seront le siège d'autres implantations industrielles dont il s'agira d'évaluer les conséquences.

En effet, le relargage des produits, lors d'un lancement, relève de la catégorie des pollutions « accidentelles » (relargage brutal), même si elle est parfaitement prévisible et contrôlée ; la multiplication des lancements vient à y ajouter la dimension chronique et donc cumulative.

On pourrait qualifier cette pollution de **pollution intermittente** : les pics importants<sup>4</sup> de pollutions apparaissant plus ou moins régulièrement dans le temps (ce terme nous semble préférable à « périodique », dans la mesure où la régularité n'est pas assurée et où le terme intermittence inclut implicitement l'amplitude importante de la pollution au moment du lancement, suivie d'une pollution nulle). Ce type de pollution, présente un intérêt général car il permet d'étudier simultanément les aspects « accidentels » (non reproductibles par essence) et « chroniques » (trop diffus et difficiles à appréhender, par nature).

Enfin, il est bon de souligner, une différence importante avec la pollution accidentelle d'origine industrielle dans la dynamique du nuage de pollution :

- pour Ariane 5, le jet est dirigé vers le bas et, pendant les premières secondes qui suivent l'allumage des propulseurs, est orienté par un système de déflexion à l'horizontale, ensuite, vu la température, le nuage passe en phase ascensionnelle. La pollution lors d'un lancement est principalement due à ce nuage. Après le décollage et pendant les premières secondes, significatives pour la pollution locale, le jet est dirigé évidemment vers le bas et se déforme sous l'influence des courants atmosphériques. Le nuage de pollution est transporté par le vent et les retombées particulaires, gazeuses et sous forme dissoute se produisent principalement dans une aire proche du site de lancement (champ proche).
- Pour une pollution industrielle d'origine accidentelle, le nuage est le plus souvent propulsé vers le haut. Une fois formé, la dynamique de transport et des retombées est semblable à celui du nuage de pollution du lanceur. Ou plutôt, c'est le nuage de pollution du lanceur, qui, une fois formé après la dynamique rapide initiale, peut être assimilé à un nuage de pollution industrielle « classique » ; ce qui justifie l'emploi d'un modèle voisin de la dynamique de ce nuage. L'assimilation de la dynamique du nuage de pollution du lanceur à une pollution « classique » de type accidentel en milieu industriel est donc valable après la phase rapide du début du lancement.

## I.2. Analyse systémique du problème

L'approche systémique consiste à décomposer le problème complexe en compartiments (ou caissons) reliés entre eux et en associant à chacun d'eux des grandeurs caractéristiques de temps et d'espace. Les relations entre ces compartiments représentent le plus souvent des flux et les processus qui gouvernent ces flux. Au total, on aboutit à une représentation schématique : schéma fonctionnel, modèle conceptuel de la situation.

Les compartiments qui ont été définis représentent les éléments (milieux) concernés, structurés spatialement suivant un gradient vertical : l'atmosphère, l'interface atmosphère-surface (correspondant principalement au couvert végétal), la surface et sub-surface, et le sol profond. On se réfèrera à la figure 1, schématisant le modèle conceptuel.

Enfin, cette démarche est complétée par une projection dans l'espace physique et géographique, par l'élaboration d'un modèle dynamique, permettant de localiser les effets prévisibles, de proposer un échantillonnage spatial et temporel des mesures et des observations pour le nécessaire suivi à long terme et le calage régulier du modèle<sup>5</sup>.

Un point important doit être souligné, celui de la « fermeture du système », c'est-à-dire de la liste des compartiments et processus significatifs et des limites de l'espace géographique sur lesquels porteront les mesures, les observations et le modèle lui-même.

---

<sup>4</sup> Rappelons que la masse de propergols dans les deux PAP est de 476 tonnes (238x2). Même si on ne considère que les premières secondes du lancement, c'est de l'ordre de 100 tonnes de produits qui vont retomber dans l'environnement immédiat. Cependant, la « dilution » est très rapide.

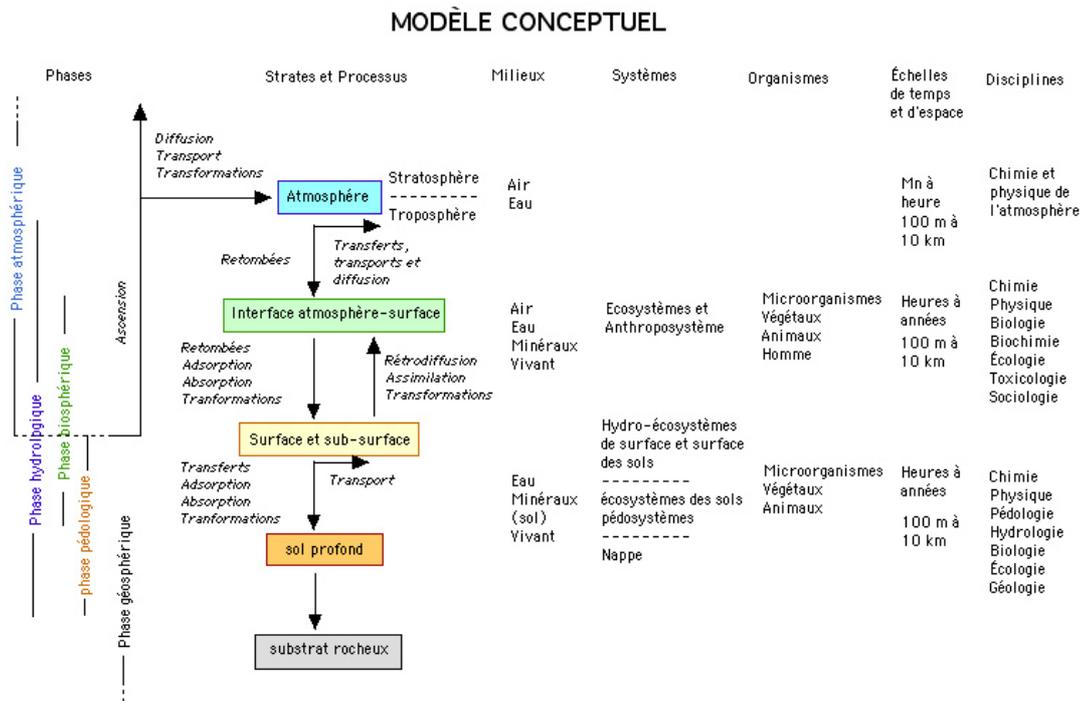
<sup>5</sup> Pour les aspects généraux concernant la modélisation en matière d'environnement, on pourra consulter l'article : Schmidt-Lainé Cl., Pavé A. - Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire. (*Natures-Sciences-Société : Sciences pour l'ingénierie de l'environnement*, t 10 : s.1, 2002, 5-25.) et les références associées.

### I.2.1. L'atmosphère

Globalement, ce milieu est le mieux connu, le plus homogène. Les phénomènes qui s'y déroulent sont de types physico-chimiques (diffusion, transport, variations thermiques, réactions chimiques). Il peut être vu comme un continuum de grandeurs caractéristiques. La précision du modèle est essentiellement due à la maille de discrétisation de l'espace et du temps, dont la taille est principalement liée à la capacité de calcul pour la simulation.

À l'échelle locale, celle qui nous intéresse, les problèmes principaux sont relatifs à la prise en compte de la turbulence, aux réactions chimiques entre les produits et les composants de l'atmosphère (principalement azote, oxygène et eau) et enfin à la connexion avec la deuxième boîte : notamment la rugosité induite par la couverture végétale. On pourra se référer à l'annexe 1, pour une analyse du modèle existant.

Le point le plus important à souligner est l'absence de module chimique (la réactivité des polluants élémentaires et les températures peuvent faire soupçonner l'existence de réactions, donc de synthèses de produits qu'il reste à identifier). On remarquera également que la sensibilité de ce modèle à ses paramètres n'a pas été étudiée systématiquement (notamment celui représentant la rugosité de la surface).



**Figure 1** – Modèle conceptuel : schématisation du problème de pollution du lanceur Ariane 5 et principales informations sur les différents éléments de ce problème (milieux, sous-systèmes, échelles spatiales, disciplines scientifiques concernées). Ce schéma peut servir de base à l'élaboration d'un modèle intégré, sans oublier que ce modèle doit être spatialisé.

### I.2.2. L'interface atmosphère-surface

Cette interface est principalement constituée par le couvert végétal. Les retombées sont en partie captées par les végétaux. La distribution fine de ces produits est gouvernée par la présence de précipitations, la surface de ce couvert (sa rugosité), la présence de turbulences locales et la structure horizontale et verticale de cette végétation.

Les observations possibles sont les suivantes : les effets sur la végétation, l'identification et la mesure des concentrations des principales retombées à la surface du sol (on ne peut pas rejeter l'hypothèse de transformations biochimiques) et l'absorption et l'assimilation par la végétation. Néanmoins, on peut penser, sur la base des observations déjà réalisées que pour l'essentiel les polluants sont lessivés à la surface des feuilles par les précipitations fréquentes (hors les quelques deux mois de vraie saison sèche). Les effets directs sur la végétation sont limités (cf. annexe 5).

La modélisation de cette interface n'a pas été réalisée. Mais la distribution à long terme des retombées sur la surface doit pouvoir être moyennée<sup>6</sup> sur l'espace géographique concerné. Les échelles significatives sont liées à la structure de la végétation (l'arbre est l'élément le plus fin, dans le cas d'une couverture arborée, une couverture herbacée peut être assimilée, pour ce qui nous intéresse, à un continuum).

Enfin, on peut rattacher à ce compartiment les composantes animales et humaines, nécessaires à suivre. La première, parce que certains animaux, par exemple des oiseaux, peuvent être de bons indicateurs. La seconde, parce que le passé nous a appris que la composante psycho-sociologique n'est pas négligeable (perception du risque, même s'il n'est pas avéré, et encore faut-il aussi le démontrer). On se référera aux annexes 6, 7 et 8.

### I.2.3. Surface et sub-surface

Ce compartiment correspond à la surface naturelle du terrain, au sol sur sa profondeur « active » en termes de présence racinaire, d'organismes vivants et de transferts hydriques et au système hydrologique de surface. Les processus importants sont :

- le transport par ruissellement et écoulement de surface
- l'infiltration dans les sols et les transferts dans les cours d'eau,
- l'action sur la composition chimique des sols et de l'eau,
- les effets sur les composantes biologiques (notamment les populations microbiennes pour les sols et les sédiments, les végétaux et animaux, surtout les poissons, pour les cours d'eau),
- les transformations chimiques et biochimiques des polluants.

Pour les suivis réguliers et à court terme, deux points nous semblent importants:

- L'évolution des modifications physico-chimiques (acidité notamment et son éventuel effet sur le déstockage de métaux lourds<sup>7</sup>, cf. annexe 4)
- Les variations des populations microbiennes, dont on sait qu'elles sont de bons indicateurs de pollutions et qui, avec les techniques actuelles, - moléculaires, sont accessibles en routine.

Enfin, pour les effets à moyen et long terme, le suivi des limites des écosystèmes locaux par les Données d'Observation de la Terre (DOT) permettrait de qualifier ces effets et leur réalité soupçonnable, mais non vérifiée (cf. annexe 1).

On voit que pour cette entité « surface sub-surface », la plus compliquée pour le problème posé, les échelles d'espace et de temps des grandeurs caractéristiques sont très diverses. Du microscopique du microsite et de quelques heures pour les populations microbiennes, au paysage (quelques km<sup>2</sup>) à l'année, pour les écosystèmes composant la mosaïque des écosystèmes.

### I.2.4. Le sol profond et l'interaction avec le socle

On peut penser à une augmentation locale de l'altération due à l'acidité supplémentaire, l'addition d'alumine étant une espèce solide et neutre n'aura pas d'effet<sup>8</sup>. Mais étant donnée la nature de sols et en première analyse, ces effets peuvent être négligés.

---

<sup>6</sup> Attention : moyennées ne veut pas dire uniformes. La distribution résultante peut se traduire par le tracé de lignes d'isoconcentrations moyennes.

<sup>7</sup> Les résultats du Programme Mercure, sur la pollution des cours d'eau par cet élément et ses dérivés organométalliques, nous montrent qu'on ne peut pas exclure cette hypothèse. La toxicologie et l'écotoxicologie de ces polluants sont connues et plus faciles à appréhender contrairement à celles des polluants d'origine organique.

<sup>8</sup> L'ajout d'aluminium ralentirait plutôt l'altération en concentrant la solution en cet élément et en l'éloignant de la sous-saturation qui favorise les dissolutions minérales.

Le problème posé présente deux aspects, le premier opérationnel, le second comme prototype, pour la recherche sur les pollutions et pour le développement méthodologique.

Le premier consiste à évaluer et si possible à anticiper les conséquences des pollutions dues au lanceur sur les milieux, les écosystèmes et leurs composantes, et sur les populations humaines. Pour cela, et étant donnée la complexité du milieu, il nous semble souhaitable d'opérer à deux niveaux par :

- le développement de sites « pilotes » simplifiés, permettant un suivi et une modélisation dynamique précise de quelques variables importantes.
- des observations, régulières mais moins serrées de quelques indicateurs en milieu naturel sur les populations humaines les plus proches

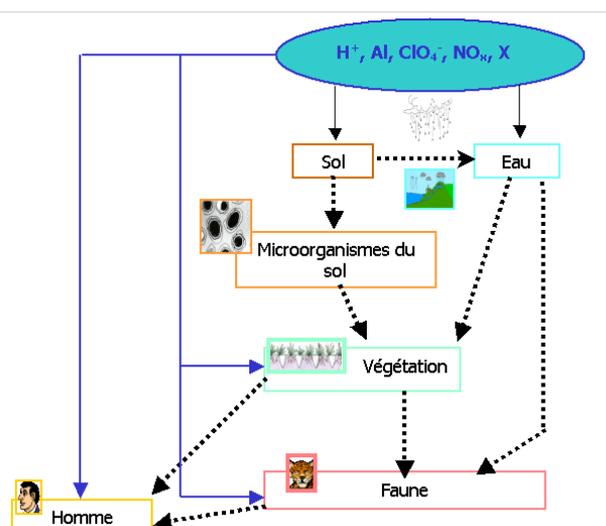
Le second, comme prototype pour la recherche sur les pollutions d'origine industrielle en milieu amazonien, nous paraît important à considérer. Ces recherches permettraient de valoriser le lanceur Ariane 5 dans un secteur non attendu a priori, pour l'étude expérimentale des impacts de ces pollutions et des processus sous-jacents, pollutions à la fois « accidentelles » et « chroniques », ainsi que pour le développement méthodologique, notamment la modélisation permettant de mieux comprendre, de mieux prévoir et de mieux anticiper.

## II. Du fonctionnel à l'opérationnel : recherche d'indicateurs

Les substances chimiques émises lors des lancements d'Ariane se retrouvent dans les différents compartiments évoqués ci-dessus (atmosphère, interface atmosphère-surface, surface et subsurface, sol profond) et peuvent ensuite être transférées d'un compartiment à l'autre.

« Un indicateur est une donnée simple que l'on sait quantifier de manière reproductible, rapide, avec un coût modéré et qui mesure, reflète, mais surtout synthétise un ensemble de phénomènes complexes, difficilement quantifiables ou souvent avec un long délai et un coût élevé. »<sup>9</sup>

La nature et les qualités des indicateurs dépendent des objectifs du suivi, mais aussi de contraintes propres au milieu et à la pollution elle-même. Ayant identifié ces particularités de l'étude, nous présenterons les types d'indicateurs envisageables pour chacun des compartiments identifiés ci-dessous (cf. figure 2), indicateurs qui seront par la suite décrits de manière plus détaillée dans la description du dispositif opérationnel et dans les différentes annexes.



**Figure 2** : Différents compartiments pouvant être affectés par des retombées de substances chimiques et où des effets peuvent être observés ou mesurés ( —> transferts directs, - - -> transferts indirects).

<sup>9</sup> GILIBERT, 1987, cité par France Nature Environnement, mai 2001

## II.1. Caractéristiques des indicateurs

Les indicateurs de suivi doivent répondre aux critères suivants :

- Confirmation de la réalité des retombées de substances chimiques (intensité et localisation) prévue par le modèle atmosphérique
- Evaluation scientifique des impacts sur les écosystèmes et la santé humaine (physique et psychologique).
- Les indicateurs doivent avoir les qualités classiques des indicateurs scientifiques, à savoir être fiables (mesures reproductibles), sensibles et interprétables.
- Communication : les indicateurs doivent alors être simples, visibles, caractérisant des objets qui présentent un intérêt pour les populations.

## II.2. Particularités du milieu impacté

Le milieu potentiellement affecté par les retombées est très diversifié. Il s'agit d'une mosaïque d'écosystèmes, aquatiques ou terrestres, eux-mêmes très hétérogènes. Ces écosystèmes, en particulier dans la zone côtière, sont relativement peu connus, car très difficilement accessibles.

Néanmoins, quelques missions sur le terrain disposant de moyens lourds (chenillette amphibie) et une large exploitation des DOT et des photos aériennes ont permis depuis quelques années de proposer des cartographies thématiques du milieu et de ces hydrosystèmes côtiers (fig. 3), rassemblées dans un SIG (cf annexe 1).

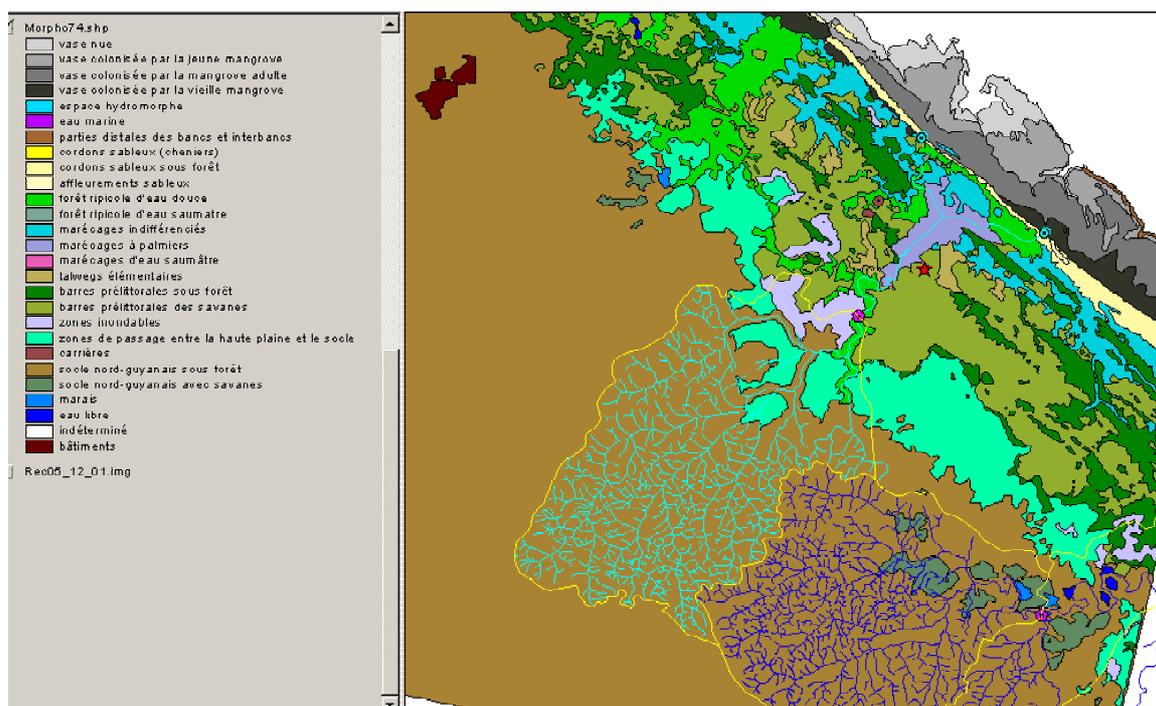


Figure 3 : carte géomorphologique du bassin de la Karouabo et des marais en aval (M.T. Prost, 1996)  
Légende : polygones : stations limnimétriques ; étoile : ZL3, cercles : exutoires.  
Echelle du document : environ 1/200 000<sup>e</sup>

Les indicateurs doivent intégrer la diversité du milieu et contourner sa difficulté d'accès. Des stations de mesures automatiques pourront être envisagées ou des méthodes de suivi à distance (photos aériennes, DOT...). Malgré cette dernière contrainte, la poursuite d'études sur le fonctionnement de ces écosystèmes est souhaitable pour interpréter d'éventuelles modifications liées aux lancements, en fonction de leur temps de réponse à la pollution, de leur capacité à l'amortir, de leur vitesse de renouvellement (ou durée de vie) ou des temps de transfert entre compartiments.

Par ailleurs, le dispositif doit être facilement accessible pour s'intégrer, pour certains sites, aux visites publiques du CSG.

### **II.3. Particularités des retombées**

Les retombées du nuage correspondent à des apports discontinus dans le temps ou « intermittents » et leur localisation peut varier à chaque lancement. Cette localisation est, de plus, imparfaitement connue à l'avance du fait de la climatologie locale. Le dispositif de suivi devra nécessairement intégrer cette variabilité spatiale des retombées. Pour cela, il s'attachera plutôt à des grands domaines, fonction de la distance à la source (champ proche, moyen, lointain) ou qui correspondent à des bassins versants hydrologiques. Les difficultés d'accès des zones impactées, précédemment évoquées, risquent d'empêcher la mise en œuvre d'un dispositif mobile, localisé a posteriori en fonction de l'intensité des retombées.

La majorité des substances émises existe déjà dans le milieu naturel ( $H^+$ , Al,  $NO_x$ ). Il conviendra donc de connaître leur bruit de fond naturel et en particulier leur variabilité spatio-temporelle naturelle, pour distinguer les apports supplémentaires liés aux retombées du nuage. Les indicateurs devront être sensibles à un apport significatif de ces substances ou à un seuil de toxicité non atteint en conditions naturelles.

Quels que soient la représentativité et le contenu informatif d'un indicateur, il rend rarement compte de tous les aspects d'un phénomène. Il pourra être nécessaire de choisir plusieurs indicateurs pour décrire plus exactement la situation, en nombre raisonnable toutefois.

Par ailleurs, tous ces indicateurs devront être étudiés par rapport à une situation témoin, spatialement isolée (hors impact) et temporellement neutre (état zéro).

### **II.4. Types d'indicateurs envisageables**

Les indicateurs peuvent être des mesures chimiques, portant sur les substances émises, à savoir, la mesure du pH, les analyses des teneurs en Al,  $NO_x$ , etc.... Ces mesures peuvent être réalisées à la surface du sol, ou bien dans le sol, l'eau, la végétation et les animaux.

A l'interface atmosphère-surface du sol (recueils sur des plaques, dans des bacs à eau...), ces mesures permettent de connaître l'intensité des retombées. Dans le sol et l'eau, les mesures peuvent permettre aussi d'identifier l'abondance des retombées à condition de les distinguer du bruit de fond naturel de ces paramètres. Des bio-accumulateurs, végétaux ou animaux « résistants » concentrant ces substances peuvent aussi être utilisés. Les techniques de mesures sont bien connues et faciles à mettre en œuvre. Leur intérêt est avant tout d'identifier voire quantifier un impact, ou de révéler les variations spatio-temporelles d'un impact.

D'autres bioindicateurs, sensibles à un excès de l'une ou l'autre de ces substances, utilisés sont envisageables. Leur sensibilité s'exprime par des altérations du niveau moléculaire au niveau populationnel. Ces indicateurs, dans ce cas, permettent avant tout d'estimer les impacts biologiques (négatifs ou positifs) des retombées, mais aussi de les localiser voire de les quantifier. Dans ce deuxième cas, il peut être intéressant de choisir une espèce ou un peuplement, animaux ou végétaux, présentant une certaine valeur psychologique (oiseaux, mammifères, etc...) ou jouant un rôle important dans un écosystème et pouvant être visible par la population.

Au niveau supérieur, un écosystème entier (mangrove, marais...) peut aussi être considéré comme un système plus intégrateur et certaines de ses caractéristiques (biodiversité des peuplements, extension de la couverture végétale...) sont alors suivies comme bio-indicateurs. Les DOT sont alors l'outil privilégié pour suivre certains indicateurs de ce type.

Il est intéressant, si possible, de relier l'état de ces bioindicateurs à l'intensité des retombées qu'ils reçoivent, évaluée à partir de la modélisation du nuage gazeux ou à partir des mesures des paramètres chimiques directement associés à la pollution.

Enfin, dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires pour l'homme, différentes sources de contamination possibles (air, eau, alimentation...) devront être suivies et analysées régulièrement (cf. annexe 8).

### III. Système opérationnel de suivi des retombées et de leurs conséquences

Il s'agit ici de mettre en place l'outil ou les outils permettant d'intégrer l'ensemble de ces réflexions dans un dispositif opérationnel, permettant de suivre l'impact dans les différents compartiments et aux différentes échelles de temps.

Il a été identifié trois grands volets sur lesquels l'étude de l'impact des tirs nominaux d'Ariane V devra s'appuyer : il s'agit de la **modélisation** de la propagation du nuage et de la distribution spatiale des retombées au sol, la mise en place de **sites pilotes** et finalement **l'observation en milieu naturel**.

#### III.1. Le dispositif actuel

Le suivi opérationnel est déjà assuré par :

- Un dispositif de terrain : l'analyse des eaux du carneau, récoltant une partie des gaz de combustion des PAP, des capteurs répartis spatialement permettant de récolter les composantes particulaires, gazeuses et dissoutes à différentes distances, et de les analyser, un suivi du pH et des analyses de l'eau des criques proches (Karouabo et Matmanoury) pour quelques éléments dont l'aluminium dissous. Par ailleurs, les populations de poisson de ces criques ont été étudiées. Ce suivi ne montre pas de perturbation majeure actuellement. Enfin, la concentration d'aluminium a été mesurée dans des plumes d'oiseaux exposés. Une augmentation de cette concentration a été observée, mais sans conséquence apparemment importante.
- Un modèle de dynamique du nuage de pollution (SARRIM, cf. annexe 2). Ce modèle doit permettre de prévoir la zone de retombées en fonction des conditions atmosphériques, notamment du vent. Il est principalement utilisé pour assurer la sécurité des personnes lors d'un lancement.

Ce dispositif n'a globalement pas montré de modification importante des milieux dès la sortie du champ proche, non plus que d'impacts significatifs sur les populations animales ou végétales exposées (sauf, pour ces dernières, celles qui sont situées à stricte proximité du site de lancement).

#### III.2. Etude « Critique » du dispositif actuel

Les points qui nous ont paru importants sont les suivants :

- L'absence d'une véritable étude de la chimie du nuage, si bien qu'on ne sait pas exactement la nature des polluants qui retombent. En effet, si la composition à la sortie des tuyères est bien connue et se compose, comme prévu, essentiellement d'alumine et d'acide chlorhydrique, on ne peut pas exclure que des réactions chimiques ultérieures se produisent entre les composés aluminés, les composés chlorés et avec les principaux composants de l'atmosphère (oxygène et azote). Les produits résultants pourraient montrer une plus grande toxicité et réactivité avec les milieux que ceux qui ont été pris en compte. On peut penser au trichlorure d'aluminium ( $\text{Cl}_3\text{Al}$ ) qui a un fort pouvoir catalytique, aux hypochloreux ( $\text{ClO}_x$ ), aux  $\text{NO}_x$ , à divers autres composés azotés (réactions à température élevée avec l'azote atmosphérique).
- L'échantillonnage spatial actuel, c'est-à-dire la répartition des capteurs, ne permet pas une bonne étude géostatistique des retombées.
- Les performances limitées du modèle actuel : des écarts importants avec les données de terrain sont observés. Par ailleurs, si les bases théoriques de sa construction sont solides, une étude de sensibilité mérite d'être faite, ne serait-ce que pour vérifier le réglage actuel de certains paramètres, comme la rugosité (cf. annexe 2).
- Sur le plan biologique, l'absence d'études sur un compartiment important et très sensible : les micro-organismes des sols (et des sédiments).
- Sur le plan physico-chimique, les modifications de pH peuvent avoir comme conséquence le déstockage de métaux lourds dans les sols. Les variations de concentration de ces éléments n'ont pas été suivies.
- Sur le plan humain, une absence de suivi des populations proches.

- Très globalement, les études menées précédemment, certes pluridisciplinaires, ont été « segmentées », mais sans véritable recherche de cohérence, sans tentative de vision intégrée et interdisciplinaire. Elles ne permettent pas de réelle prévision, notamment à long terme, des conséquences des pollutions.

### III.3. Une approche intégrée et interdisciplinaire

Les avancées les plus significatives des systèmes technologiques correspondent le plus souvent à des efforts et à des progrès conceptuels. Le premier exemple est précisément le lanceur Ariane 5, quand on le compare à son prédécesseur, même si celui-ci a connu un succès remarquable. C'est vrai aussi pour les dispositifs opérationnels de suivi des pollutions.

C'est pour cette raison que nous avons choisi de faire cet démarche conceptuelle. Une amélioration du dispositif, même optimisée, aurait été satisfaisante et suffisante dans une perspective à court terme, mais on peut espérer que ce lanceur aura une durée de vie, au moins aussi longue que son prédécesseur. Il est donc nécessaire de se placer dans une perspective à long terme.

La figure 1 représente le schéma conceptuel et cette partie est consacrée à une analyse globale du problème. La partie 2 a pour objectif de repérer les éléments qui permettront de passer à la phase opérationnelle. La conception d'un système opérationnel « idéal », fondée sur les connaissances les plus actuelles, est traitée dans cette partie. Nous précisons idéal, car la mise en œuvre concrète demandera sûrement des simplifications, de faire des choix, pour des raisons techniques, pour des raisons de logistique et de coûts. Mais les éléments de ces choix pourront s'appuyer sur cette analyse, sur cette conception et sur une proposition d'échelonnement dans le temps suivant ce que nous pouvons considérer, aujourd'hui, comme des priorités.

Le principe essentiel consiste en une approche intégrée de type expérimental, complétée par des observations et des mesures en milieu naturel, et confortée par l'élaboration et l'utilisation de modèles. Enfin, la dimension humaine et sociale ne doit pas être négligée. Même si on peut penser que le risque est faible, il ne faut pas sous-estimer la **perception** de ce risque par ces populations.

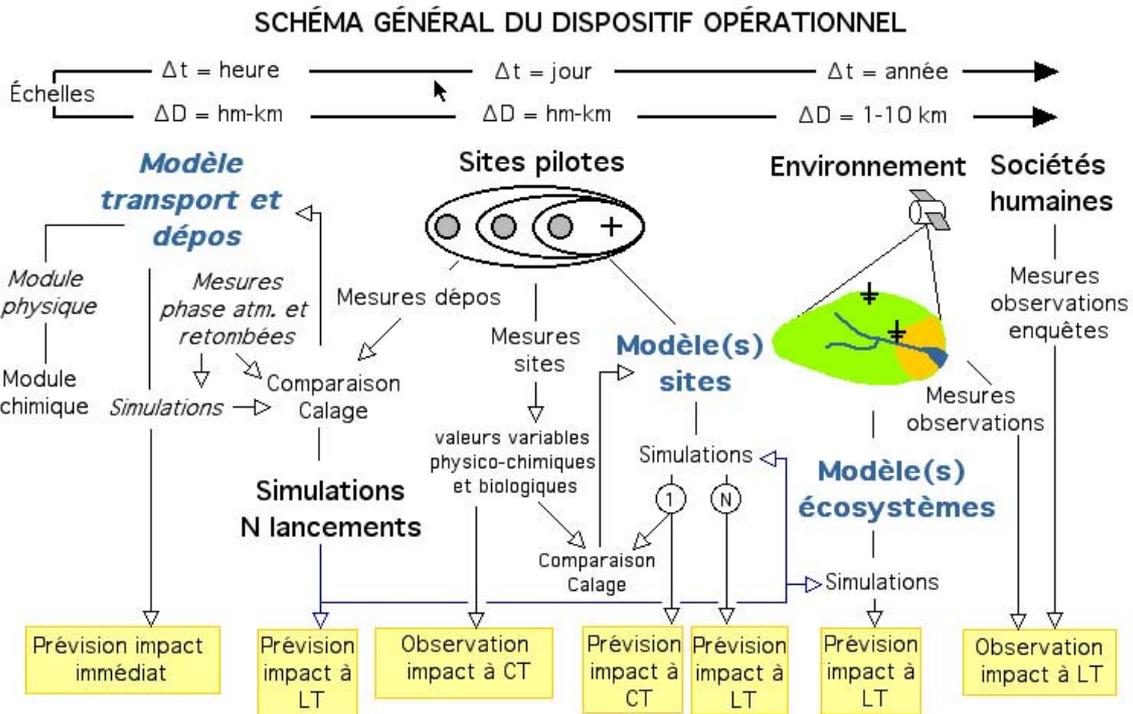
### III.4. Description du dispositif opérationnel

Les éléments essentiels sont représentés dans la figure 4. On retiendra que les approches proposées ne sont pas indépendantes et qu'elles correspondent à ces catégories de processus dont les grandeurs caractéristiques, temporelles et spatiales, sont bien spécifiées. Les propositions faites ici sont appuyées sur l'analyse de la situation, nous ne reviendrons pas sur l'argumentation qui peut se trouver dans les parties précédentes et dans les annexes ; le moment venu, ces propositions devront être précisées par des dossiers techniques.

#### III.4.1. Le dispositif pour les processus rapides

Une part importante de ce dispositif existe déjà :

- le modèle SARRIM (cf. annexe 2), qui, moyennant quelques améliorations, est une base solide. On retiendra la nécessité de lui adjoindre un module de cinétique chimique sur la base d'une étude de la chimie du nuage.
- Le dispositif de terrain doit être perfectionné. On peut mieux utiliser les résultats de SARRIM, pour concevoir un meilleur échantillonnage spatial et temporel. En effet, une fois opérationnel, le modèle permettra de réaliser un **zonage** de la surface impactée en repérant le champ proche, le champ moyen et le champ lointain pour des conditions climatiques moyennes. Ce zonage permettra, en particulier, de concentrer les investigations dans le milieu naturel et d'aider aux choix dans la disposition des sites pilotes. Par ailleurs, il permettra de déterminer, selon les conditions climatiques prévalant au moment du tir, la répartition spatiale et temporelle des retombées associées à chaque tir du lanceur avec une marge d'incertitude connue.



**Figure 4 :** Le dispositif opérationnel. Ce dispositif ne permet pas seulement d'évaluer les impacts (CT : court terme et LT : long terme) mais aussi de les prévoir. Cette prévision peut alors permettre de les anticiper (faire qu'ils n'apparaissent pas ou limiter leur amplitude et leurs conséquences).

Outre une utilisation pour prévoir l'impact immédiat, on peut envisager d'utiliser le modèle pour simuler une succession périodique de lançements. Les résultats pourraient constituer des entrées d'autres modèles permettant des prévisions à moyen et long terme.

#### III.4.2. Le dispositif pour des échelles moyennes : des sites pilotes

Entre les observations immédiates des retombées et l'étude des conséquences sur le milieu naturel, il nous est apparu nécessaire de prévoir un dispositif intermédiaire : les sites pilotes. En effet, d'une part, le modèle et le dispositif précédent ne permettent qu'une évaluation des retombées et, d'autre part, la complexité du milieu naturel limite les études à court terme et leur pertinence.

Pour ces raisons, il est souhaitable de constituer des systèmes simplifiés dont les principales variables seraient mesurées régulièrement. Deux à trois sites les plus identiques possibles, à divers éloignements (champ proche, champ moyen et champ lointain) ainsi qu'un site témoin, hors champ des retombées, constitueraient des instruments de mesure. Ils seraient constitués (figure 5):

- D'un bassin pour analyser les perturbations en milieu aquatique : suivi des principales variables physico-chimiques et d'organismes aquatiques (variables physico-chimiques : pH et concentrations en aluminium et en produits chlorés, variables bio-écologiques : principalement des micro-organismes, on peut penser à peupler ces bassins avec des poissons, de préférence d'une espèce, et à suivre la dynamique de cette population). Ce bassin serait instrumenté.
- De végétaux connus pour leur sensibilité (par exemple, des bananiers)
- Des sols environnants, dont un suivi physico-chimique et bactériologique serait assuré.

L'intérêt principal de ces bio-stations est de disposer de sites semi-naturels dont il sera possible, du fait de leur accessibilité et de leur simplicité relative (par rapport au milieu naturel proprement dit), de contrôler le fonctionnement et l'évolution par un « monitoring » adapté.

Ce monitoring devra permettre de quantifier

- les entrées et sorties d'eau du système (par la mise en place de capteurs limnimétrique et pluviométrique)
- les entrées et sorties de solutés dont le devenir est susceptible d'être affecté par les tirs du lanceur, en particulier  $H^+$ , Al,  $NO_x$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ , et éléments traces. Le suivi pourra être assuré de manière quasi-continue par la mise en place de capteurs physico-chimiques et par le prélèvement régulier d'échantillons (fréquence adaptée à la variabilité temporelle des éléments étudiés)
- d'éventuelles adaptations physiologiques et/ou comportementales de la biomasse bactérienne, végétale et animale, quantifications rendues possibles par des conditions d'observation idéales et par des prises d'échantillons régulières.

Ces sites pourront donc s'apparenter à des « laboratoires *in situ* » où l'acquisition relativement facile de mesures dans différents domaines (physico-chimie, biogéochimie, biologie végétale et animale) permettra d'étudier précisément les processus mis en jeu et leur évolution éventuelle sous l'influence des tirs du lanceur.

La disposition des sites pilotes le long du gradient de pollution permettra d'évaluer l'impact par inter-comparaison entre sites

Un modèle de fonctionnement des sites permettrait de synthétiser les connaissances et de pouvoir faire des prévisions à long terme. Par ailleurs, les données des retombées sur les sites pourraient être aussi utilisées pour le calage de SARRIM.

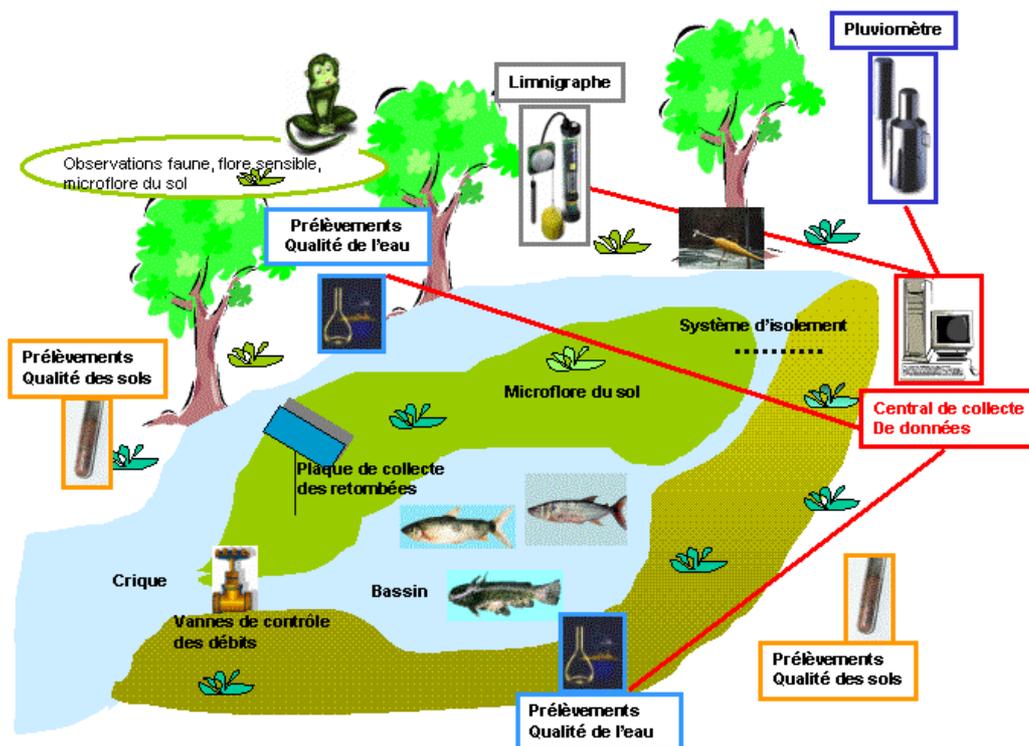


Figure 5 : schéma d'une biostation

### III.4.3. L'environnement

L'environnement, même proche de l'aire de lancement, est constitué d'une mosaïque d'écosystèmes (zone arborées, herbacées et humides). Cette mosaïque contribue à la complexité de cet environnement. Mais on peut utiliser cette complexité pour mieux appréhender les effets à long terme : modification de leur structure en espèces, modifications de leurs limites. On retiendra cependant que la nature des sols et l'acidité des milieux aquatiques mènent à penser que, hors du champ proche, l'impact ne peut être qu'à long terme.

Si le monitoring de « sites pilotes » est extrêmement prometteur en terme d'outil de compréhension des mécanismes régissant le fonctionnement du milieu et des influences possibles des tirs du lanceur, il est bien clair que les réponses ne peuvent être que partielles du fait de l'extrême complexité des phénomènes mis en jeu dans le milieu naturel. Par contre, la complexité de cet environnement peut être utilisée pour mieux appréhender les effets à long terme : modification de leur structure en espèces (faune flore), modifications de leurs limites spatiales (forêt, savanes, marais...).

L'impact physiologique de ces retombées sur la majorité des végétaux résulte principalement de l'acidification des sols, qui s'accompagne d'un appauvrissement par exemple en ions nutritifs  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  (cf. annexe 5). L'impact physiologique des retombées sur les organismes animaux n'a pas été clairement démontré ni écarté dans la mesure où les individus n'ont pas pu être suivi dans le temps. Cependant, comme en témoignent les travaux menés en Europe et en Amérique du Nord, relatifs aux phénomènes des pluies acides (qui se rapprochent quelque peu des impacts possibles des tirs du lanceur), la conjonction d'une augmentation de l'acidité et des teneurs en aluminium peut conduire à une perturbation importante des populations d'oiseaux (cf. annexe utilisation des oiseaux comme bio-indicateurs).

Le suivi dans le milieu naturel doit donc s'inscrire dans la **durabilité au niveau de sites et de parcelles végétales de référence et d'individus animaux marqués** afin de pouvoir disposer de chroniques temporelles. Des campagnes périodiques de terrain (à une fréquence annuelle, une fois maîtrisées les variations inter-saisonniers) et un suivi par les DOT (cf. annexe 1) seraient suffisants.

Des mesures complémentaires en milieu naturel, peu coûteuses, pourraient être faites (mesure de pH, dosage de certains éléments, dont les composés aluminés et des métaux lourds, principalement le mercure<sup>10</sup>, évaluations épisodiques de peuplements halieutiques). Pour identifier une dérive potentielle à long terme des communautés végétales, deux approches complémentaires sont proposées : d'une part, l'étude de l'évolution de la végétation forestière et herbacée sur des parcelles de référence, et d'autre part, à une échelle spatiale plus grande, un recours aux DOT qui renseigneront sur l'évolution des frontières entre les différents écosystèmes végétaux qui composent le paysage. Ces informations, relayées par une bonne connaissance de l'évolution du « bruit de fond » physico-chimique, par le suivi *in situ* des communautés végétales, permettrait de mettre en évidence, si il y a lieu, une dérive progressive du milieu et des écosystèmes qui le composent.

Enfin, on doit envisager l'élaboration d'un modèle (pas trop complexe) de fonctionnement de cet environnement pour faire des prévisions à long terme, en le couplant avec les résultats des simulations du modèle SARRIM.

#### III.4.4. Les populations humaines

Étant donnée la direction des vents dominants (quart de quadrant NNE-ESE), les retombées se font dans leur presque totalité dans le quart de quadrant SSO-OSO, la distance des plus proches habitations humaines et leur situation (supérieure à 10 km, NO), la nature de retombées (gaz, solutions, particules, et, sous réserve d'inventaire, HCl et  $Al_2O_3$ ), en dehors d'un accident majeur (explosion du lanceur à basse altitude), l'exposition directe des populations humaines est faible, voire nulle, et le risque associé est donc, lui aussi, très faible. En revanche, l'exposition indirecte, principalement par voie alimentaire, doit être évaluée (des précautions simples peuvent être prises sur les produits de la chasse et de la pêche, et sur les productions agricoles).

Cependant, la perception du risque doit être prise en compte. Les informations disparates dont on peut disposer montrent qu'elle ne peut pas être ignorée. Par ailleurs, les incertitudes, même faibles, ne peuvent pas être négligées. Il y a donc lieu à la fois d'être très clair dans les messages transmis à la population, de montrer qu'un suivi régulier est assuré (sites pilotes, observations périodiques de l'état et de l'évolution des écosystèmes) et d'assurer un suivi de l'état de santé (collectes d'informations auprès des autorités sanitaires et des praticiens, enquêtes épisodiques).

#### III.4.5. Les aspects méthodologiques : bases de données et modélisation

---

<sup>10</sup> les marais d'eau douce riches en vases organiques et où les conditions sont souvent anoxiques en profondeur pourraient conduire, dans ces conditions, à la production du méthylmercure.

Les données recueillies (chrono et géoréférencées, pour la plupart d'entre-elles) doivent être organisées dans une base de données unique facilement utilisable. De plus, il serait intéressant de procéder à un stockage systématique de quelques échantillons animaux et végétaux, dès que possible, afin de conserver une « mémoire » environnementale pour l'avenir.

La modélisation fait maintenant partie de l'arsenal des outils indispensables pour ce type d'opération. Des indications ont été données sur les améliorations à apporter au modèle SARRIM. Pour être encore plus crédible, un effort devrait être fait pour l'élaboration de modèles de fonctionnement des sites pilotes et des écosystèmes. Ces travaux pourraient être faits en partenariat avec les instituts de recherche et des bureaux d'études spécialisés.

#### III.4.6. Les pollutions dues au lanceur Ariane 5 : un cas d'école

Comme nous l'avons signalé dans la première partie, outre l'intérêt immédiat et opérationnel du suivi des pollutions et de leurs conséquences, nous sommes en présence d'un cas d'école permettant de mettre au point des méthodes et des techniques transposables à d'autres situations.

Du côté de la recherche publique, l'étude et le suivi de ce cas d'école seraient très profitables. Pour cela, on pourrait envisager que la zone concernée (aire de lancement, sites pilotes, écosystèmes proches) soit intégrée dans un observatoire de recherche en environnement (ORE). Nous avons proposé, dans le cadre du développement de la recherche en Guyane la création d'un ORE « impacts de systèmes industriels en région amazonienne » (ISIRA). Cet ORE regrouperait le barrage de Petit-Saut, cette zone et une aire d'exploitation industrielle d'or. Il pourrait être l'élément fondamental d'une coopération à long terme entre les entreprises concernées et la recherche publique. Les résultats obtenus, les techniques et les méthodes mises au point devraient être transposables ou adaptables à d'autres situations (généricité). Cette opération aurait de plus, une grande visibilité internationale.

## IV. **Recommandations et priorités**

Les recommandations des experts ont été synthétisées dans le tableau suivant, qui distingue les recommandations par discipline et la nature des actions proposées.

<b>Thématique/ Disciplines</b>	<b>Recommandations</b>	<b>Nature des actions</b>
Observation de la Terre	-Cartographie régulière des milieux (typologie existante) -Surveillance des zones sensibles à différentes échelles (Espace / temps) -Couplage modèle SARRIM/ SIG et simulation d'impacts de séries de lancements sur les milieux	-Expertise  -Expertise  -Recherche/Expertise
Chimie de l'atmosphère	Étude de la chimie du nuage	Recherche
Modélisation	- Étude de la structure du code SARRIM et détermination des paramètres sensibles et de ceux qui sont limitants dans la précision des résultats : étude de sensibilité, robustesse - Mise en cohérence des précisions relatives des différents modules et éventuelles mise à niveau de certains d'entre eux - À partir de seuils de polluants, détermination des zonages (comme seuils a priori, on peut citer : les seuils définis par des normes sanitaires, les seuils de détection dans un système expérimental), évaluation des maxima de polluants par une méthode de type sur- et sous-solutions.	Recherche : Thèse (CNRS, Cemagref)

	- Modélisation de la chimie du nuage calibrage des mesures et bruit de fond	
Génie des procédés bioécologiques (Sites pilotes)	-Mise en place de trois biostations : champ proche, champ moyen, champ lointain (témoin) <sup>11</sup> : -Suivi de la qualité de l'eau (paramètres physico-chimiques) -Suivi d'une population de poissons -Suivi des populations microbiennes (sédiments et/ou sols) -Suivi d'un bio indicateur végétal : le bananier -Modèle de fonctionnement de la bio-station	-Recherche : Partenaire à trouver
Hydrologie	-Continuité et extention des mesures (hydrologie, piézométrie) -Connaissance topographie détaillée par MNT laser pour étude des écoulements	-Expertises  -Expertise
Hydrochimie	-Métrologie chimie sol modélisation circulation polluants -Validation du modèle par mesures de terrain -Contrôle site biostations -Etude : teneurs / réponse bio-indicateurs	-Recherche scientifique : thèse ou post-doc  -Expertise : mesures sur les biostations
Ecophysiologie végétale	-Suivi du bio-indicateur <i>Cecropia</i> (Bois Canon) -Suivi de communautés végétales en champ proche	-Opérationnel : à mettre en place sur les biostations -Expertises
Ornithologie	Sur des espèces indicatrices : -suivi populations (épisode) -suivi peuplements (épisode)	-Expertise
Ichtyologie	-Espèces indicatrices -Suivi annuel des peuplements sur les deux bassins concernés	-Expertise sur les biostations -Expertise
Santé publique	-Identification populations -Etude des expositions et du bruit de fond -Communication -Analyse du risque -Etude épidémiologique	-Expertise -Partenariat avec acteurs locaux id. id. id.
Réglementation	-Mise en œuvre de la loi sur l'eau -Etudes d'anticipation de la mise en œuvre de la loi sur l'air	-Expertise

Au niveau des priorités, le groupe d'experts s'est prononcé sur les recommandations suivantes :

1. Étude plus précise de la chimie et de la physique du nuage, amélioration du modèle SARRIM et adaptation du dispositif de mesure
2. Mise en place du dispositif de surveillance de santé publique
3. Étude technique et mise en place des sites pilotes, développement de modèles de fonctionnement de ces sites
4. Étude technique et mise en place du système d'observation des écosystèmes, développement des modèles d'évolution de ces écosystèmes.

En parallèle à ces opérations, il est nécessaire de prévoir très tôt la constitution d'une base de données évolutive (en fonction de la mise en place des systèmes de terrain) et, si cette proposition est retenue, de participer à la mise en place de l'ORE **ISIRA**.

<sup>11</sup> L'examen des données recueillies montre que trois sites sont suffisants et que celui en champ lointain peut être considéré comme site témoin.

## L'ingénierie des systèmes écologiques<sup>12</sup>

Très schématiquement, la notion de système écologique recouvre l'ensemble des entités des niveaux d'organisation du monde vivant supérieur à l'individu, de la population à l'écosystème. Elles sont plongées dans un milieu naturel, semi-naturel ou artificiel. Ce milieu a des composantes biologiques (autres populations, communautés, peuplements) et géophysicochimiques (sol, air, eau, température, humidité). Il est structuré dans l'espace et change dans le temps. L'entité concernée interagit avec les autres composantes du milieu dans lequel elle est plongée. Elle évolue sous sa propre dynamique et sous l'effet de forçages extérieurs, d'origine naturelle, comme le climat, ou anthropique, comme des pollutions. Elle se distribue dans l'espace. Elle participe à la structuration de cet espace et à l'évolution des milieux.

A l'action (ou la perturbation) à laquelle un système écologique est soumis (la commande ou le contrôle, dans le vocabulaire des automaticiens), est associée la nécessaire observation de l'état du système, soit directement des variables d'état, soit indirectement par le biais d'indicateurs (ou d'observables). À la conception des modes d'action est donc nécessairement associée l'identification ou l'élaboration d'indicateurs et de capteurs susceptibles de faire ces observations (si possible des mesures), permettant de suivre l'évolution du système. De plus, le suivi de l'état d'un système est d'autant plus efficace qu'il existe un modèle de sa dynamique associant actions, observations et variables d'état. On voit donc que les concepts développés pour les procédés industriels peuvent être, au moins en partie, transposés pour l'ingénierie des systèmes écologiques, la grande différence réside dans la part de la complexité de ces systèmes (hétérogénéité, nombreuses composantes et processus, plus ou moins bien identifiés, non linéarité de ces processus) et par la difficulté d'observation et de modélisation.

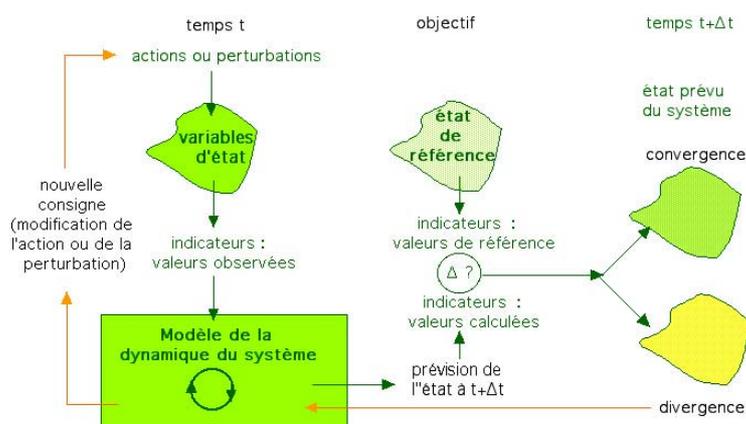


Schéma de principe (et idéal) de l'ingénierie des systèmes écologiques

Tout cet arsenal, dont une grande partie reste à construire, a des finalités. Très généralement il s'agit d'évaluer l'écart entre un état de référence et un état observé d'un système, d'estimer si cet écart nécessite une action pour se rapprocher de cet état de référence ou non. La définition de l'état de référence est extérieure au champ de l'ingénierie des systèmes écologiques, elle dépend des objectifs que l'on se donne (préservation ou maintien, transformation, production d'un bien ou d'un service). En revanche, sa traduction opérationnelle (valeurs critiques des variables d'état, traduites par des mesures ou des observations sur des indicateurs) est intégrée dans ce champ.

L'ingénierie des systèmes écologiques inclut donc

- l'identification ou l'élaboration d'indicateurs permettant une bonne évaluation de l'état d'un système écologique ;
- la définition des modes d'action conduisant un système au voisinage d'un état choisi à l'avance (l'état de référence) ; ces modes d'action peuvent évoluer dans le temps (stratégie adaptative) pour corriger les biais, pour tenir compte de modifications d'objectifs ;
- la traduction opérationnelle d'un objectif, d'une politique en termes de valeurs de références des indicateurs ;
- la modélisation de la dynamique de ce système couplant dynamique interne, effet des actions sur cette dynamique, évolution attendue des indicateurs ;

Ce secteur doit se fonder sur les connaissances de bases, acquises ou à acquérir, sur les processus spontanés en œuvre dans les systèmes écologiques. Mais ces connaissances ne sont, le plus souvent, pas suffisantes pour définir des modes d'action (ou pour prévoir l'effet de perturbations connues sur ces systèmes). Ce qui distingue ce secteur par rapport à l'écologie, c'est la définition scientifique de ces modes d'action et des observations de l'état du système, des méthodes à mettre en œuvre et des moyens techniques à concevoir et à utiliser pour y parvenir. Des recherches spécifiques doivent être développées à ces fins, en particulier pour définir des fondements théoriques permettant de concevoir des technologies et leurs modes d'utilisation, en général plus simples et plus fiables que ceux qui sont bâtis sur l'empirisme ou la simple compilation des connaissances factuelles.

Enfin, l'une des principales finalité de l'exercice consiste en " l'élaboration **d'outils et de méthodes pour la gestion et l'aménagement durable des territoires.** "

**On replacera, sans difficulté la problématique d'études des impacts du lanceur Ariane 5 sur les systèmes écologiques, situés a proximité de l'aire de lancement, dans ce cadre général d'analyse.**

<sup>12</sup> L'exposé présenté ici est en grande partie tiré de : Barbault R. et Pavé A. Écologie des territoires et territoires de l'écologie. RST « Etudes sur l'Environnement: de l'échelle du territoire à celle du continent », Académie des Sciences (à paraître, 2003).

## Groupe d'experts :

Patrick **Andrieux** (INRA) : Sols et transferts hydriques

Marie Paule **Bonnet** (INPG) avec l'appui de Patrick **Seyler** (IRD) : Géochimie.

Michel **Cavaillès**, Guillaume **Fabre** (BRL*Ingénierie*) : Réglementation environnementale

Jean-Marie **Fotsing** (Université d'Orléans, Directeur du DESS Géomatique) : Géographie  
Coordinateur du rapport de synthèse des acquis et de l'effort de recherche.

Jean-Pierre **Garrec** (INRA-Nancy, Directeur du laboratoire Pollution Atmosphérique) : Ecophysiologie végétale.

Catherine **Grimaldi** (INRA) : Hydrochimie.

Yves **Lévi** (Laboratoire Santé Publique et Environnement, Université Paris Sud 11, Président de la section des eaux du Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France ) : Santé publique

Marc **Lointier** (IRD) : Hydrologie des zones humides, observation de la Terre.

Bernard **de Mérona** (IRD) : Faune ichtyologique.

Alain **Pavé** (CNRS, membre de l'Académie des Technologies, président du groupe d'experts) : écologie et modélisation.

Laurent **Polidori** (IRD) : Observation de la terre.

Daniel **Sabatier** (IRD) : Ecologie végétale.

Claudine **Schmidt-Lainé** (CNRS, Directrice Scientifique du Cemagref, Expert à l'Académie des Technologies ) : Modélisation.

Olivier **Tostain** (cabinet ECOBIOS) : Ornithologie.

Personnel contractuel :

Pascale **Coupré** (Géomaticienne) : réalisation du système d'information.

David **Huaman** (Expert senior) : synthèse des acquis et de l'effort de recherche.