

# BILAN DES PROJETS TERMINÉS

Appels à projets 2007, 2008 et 2011

Octobre 2015





## Introduction

### Matériaux et Structures pour l'aéronautique

- ARCS p. 5
- COFFECI p. 6
- EMMAV p. 7
- I2MC p. 8
- OSYCAF p. 9

### Systèmes embarqués

- CASA p. 11
- FDAI-UV p. 12
- PLASMAX p. 13
- ROSACE p. 14
- SYMIAE p. 15
- TOAST p. 16

### Systèmes complexes : Assimilation des données

- ADTAO p. 18

### Système Terre et Espace

- ACCLIMAT p. 20
- CYMENT p. 21
- ITAAC p. 22
- MAELIA p. 23
- MAISOE p. 24
- POGQA p. 25



## INTRODUCTION

Depuis sa création en 2007, le RTRA « Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace » (STAE) a soutenu 39 projets de recherche.

18 d'entre eux sont terminés. Ils ont fait l'objet d'un colloque de restitution ouvert à la communauté scientifique académique et industrielle et d'un rapport de fin de projet consultable sur demande auprès de la fondation STAE.

Vous trouverez dans ce fascicule une fiche relative à chacun de ces 18 projets qui vous permettra en un minimum de temps de situer la question traitée, les partenariats impliqués et les résultats marquants. Il permet aussi de se faire une idée sur les applications industrielles éventuelles. Il est clair que cette présentation synthétique n'a pas pour but de rendre compte de la totalité des résultats mais simplement de donner un aperçu de l'ensemble des actions que le RTRA STAE a soutenues.

Il est destiné à la communauté scientifique, aux tutelles des laboratoires qui se sont impliqués dans les projets et aux responsables des diverses structures régionales ou nationales qui prêtent intérêt aux travaux de recherche menés dans le domaine aéronautique et spatial.

Une information plus exhaustive peut être obtenue, si nécessaire, auprès des responsables des projets ou en contactant le RTRA STAE.

Ce fascicule porte sur les projets qui se sont terminés au plus tard en 2015. Il reprend, en le complétant, le fascicule paru en 2014. Une version électronique est disponible sur le site de la Fondation STAE : <http://www.fondation-stae.net/fr/actions/bilan-projets-terminees.html>

Je vous souhaite bonne lecture de ce document et reste à l'écoute des commentaires qu'il pourrait vous suggérer.

Très cordialement

Yvan Ségui  
Directeur du RTRA STAE

- Contacts :  
Yvan Ségui (directeur) : [yvan.segui@fondation-stae.net](mailto:yvan.segui@fondation-stae.net)  
Michel Ruffat (secrétaire général) : [michel.ruffat@fondation-stae.net](mailto:michel.ruffat@fondation-stae.net)  
Françoise Arnaud (assistante) : [francoise.arnaud@fondation-stae.net](mailto:francoise.arnaud@fondation-stae.net)
- Notre site web : <http://www.fondation-stae.net/fr/fondation-stae/presentation.html>





## Matériaux et Structures pour l'aéronautique

- ARCS
- COFFECI
- EMMAV
- I2MC
- OSYCAF







**Coordinateur :** Eric Andrieu (CIRIMAT)

**Laboratoires participant :** CIRIMAT, CEMES, ICA LGP (Tarbes), CROMEP

**Début du projet :** 2008      **Durée :** 3 ans

### 1- Contexte général:

Ce projet était subdivisé en 4 sous projets qui, tous, visaient à :

- Trouver des réponses à des problèmes avérés, identifiés au cours d'études à finalité industrielle dans le secteur aéronautique.

- Epruver des démarches amont pour statuer sur leur applicabilité et définir le cas échéant les marges de progrès.

Trois projets portaient sur le comportement sous contrainte et le vieillissement des alliages métalliques et un sur les effets de contraintes couplées (thermiques, hydriques, mécaniques) sur les propriétés mécaniques des composites époxy/fibres de carbone.

### 2- Aspects novateurs du projet :

#### 2.1 : ESPINO :

La principale nouveauté est dans l'approche utilisée pour la modélisation qui peut rendre compte de l'effet des contraintes externes pour expliquer la cinétique de décomposition de l'alliage.

#### 2.2 : ACCOTHESES :

L'anisotropie du coefficient de dilatation des cristaux de structure hexagonale (Zr, Ti, Zn) provoque, lors du refroidissement des polycristaux, des incompatibilités de déformation inter cristaux qui engendrent des contraintes internes. La restauration de ces contraintes résiduelles pourrait être assurée par la ségrégation d'éléments interstitiels tels que le carbone, l'oxygène ou l'hydrogène présents dans ces métaux ou alliages. Le projet a permis de statuer sur la pertinence d'un tel mécanisme. L'approche s'est appuyée à la fois sur une démarche expérimentale et théorique.

**2.3 RADOS :** Analyse complète de la microstructure d'un superalliage après fluage haute température (>1000°C). Etude des réseaux de dislocation aux interfaces entre les phases  $\gamma'$  et  $\gamma''$  de l'alliage.

**2.4 3EI :** Il s'agit de caractériser le comportement d'interfaces de composites epoxy/fibres de carbone en fatigue en vue de faire postflamber les structures composites aéronautiques dans le domaine de vol.

### 3- Résultats acquis :

Voir au verso

### 4- Collaborations mises en place dans le projet :

L'ensemble de ce projet a mobilisé une vingtaine de chercheurs dont 6 post doctorant recrutés par le RTRA.

Des suites existent sous forme d'une ANR, de collaborations établies avec Poitiers et Nancy au cours du contrat. Une collaboration s'établit avec Oujda (Maroc) à travers un post doct recruté pendant le projet maintenant en poste au Maroc.

### 5- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le niveau est évalué à 2/3 pour les projets ESPINO, ACCOTHESES et RADOS. En effet pour ces trois projets les concepts ont été formulés et les bases théoriques établies et, pour partie, les validations expérimentales démontrées. Le projet 3EI a atteint le niveau 6 puisqu'il en est au stade de la démonstration technologique.

# Résultats acquis

## RADOS: Rafting And Dislocations in Ordered Superalloys

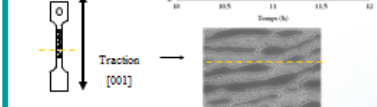
Resp: Bernard Viguière  
CIRIMAT-CEMES

Le comportement en fluage d'un superalliage base Nickel, utilisé pour les aubes de turboréacteur, est étudié dans des conditions de cyclage thermique à très haute température (>1000°C). L'objectif de ce travail est de comprendre les mécanismes à l'origine de ce comportement.

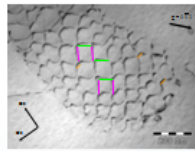
Le superalliage MC2

Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta
Bal.	7,21	4,93	2,06	1,1	3,43	1,3	3,6

La microstructure des précipités (en rouge) est examinée à divers moments du cycle thermique.



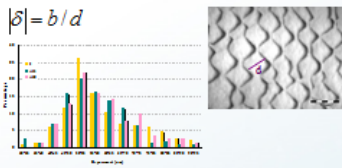
### Morphologies des réseaux d'interface



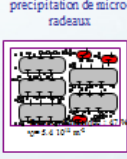
$a/2[110]$   $a/2[1\bar{1}0]$

Dislocations coin

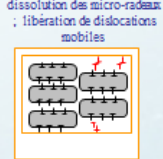
### Estimation du désaccord paramétrique



Basse Température : précipitation de micro-radeaux



Haute Température : dissolution des micro-radeaux ; libération de dislocations mobiles



$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\rho + \Delta\rho_m}{\rho}$$

Les réseaux de dislocations aux interfaces sont stables au cours du fluage en cyclage thermique : morphologie identique et désaccord paramétrique comparable. La précipitation / dissolution de petits radeaux induit la libération de dislocations mobiles.

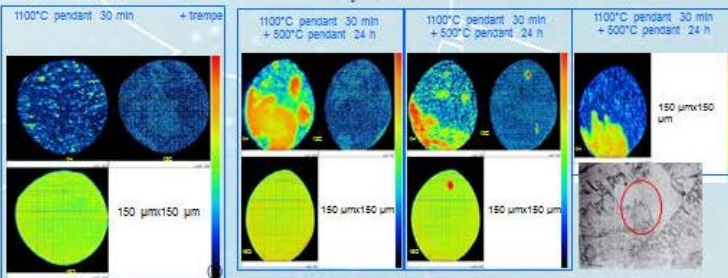
Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence la stabilité des réseaux d'interfaces au cours du fluage en cyclage thermique, tout en soulignant l'importance des phénomènes de précipitation et de dissolution de précipités  $\gamma'$  sur la densité de dislocations mobiles. Cette augmentation ponctuelle de densité de dislocations mobiles permet d'expliquer l'accélération du fluage du superalliage en condition de fluage anisotherme.

## ACCOTHS: Accommodation des Contraintes d'origine Thermique dans les polycristaux Hexagonaux par Ségrégation d'éléments interstitiels

Resp: Joël Alexis  
LGP-CIRIMAT

L'anisotropie du coefficient de dilatation des cristaux de structure hexagonale (Zr, Ti, Zn) provoque, lors du refroidissement des polycristaux, des incompatibilités de déformation inter cristaux engendrant des contraintes internes. La relaxation de ces contraintes résiduelles pourrait être assurée, pour partie, par la ségrégation d'éléments interstitiels qui agissent sur le rapport d'élanement de la maille hexagonale (c/a) tels que le carbone, l'oxygène ou l'hydrogène et parallèlement sur le comportement mécanique. Le projet réalisé associe des approches théorique et expérimentale.

### Distribution des éléments interstitiels pour différents états métallurgiques du Zr

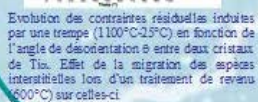


(a) Après trempe à l'azote liquide depuis le domaine  $\beta$ , pas de contraste chimique visible

(b) Après un traitement de 24h à 500°C, présence de contraste chimique entre les grains (hydrogène)

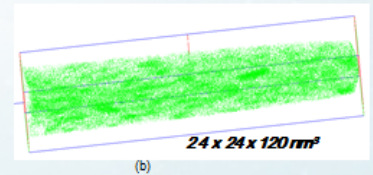
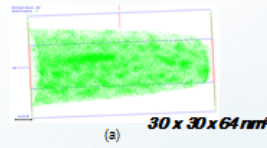
#### Synthèse:

Illustration de résultats obtenus respectivement sur le Zr et sur le Ti. La démarche expérimentale adoptée dans le cadre de cette étude révèle un effet significatif des interstitiels et plus particulièrement de l'hydrogène sur l'accommodation des contraintes d'origine thermique. Cet élément, grâce à sa grande mobilité et son effet important sur l'élanement de la maille à la capacité d'assurer la relaxation des contraintes d'origine thermique. Les questions qu'il convient de se poser à l'issue de ces travaux sont le rôle joué par l'hydrogène d'une part, sur les propriétés mécaniques locales et d'autre part, sur les transformations de phases.



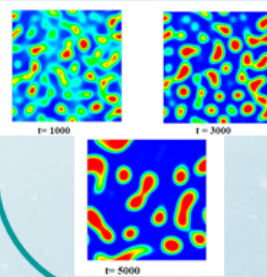
Resp: Jacques Lacaze  
CIRIMAT-GPM

## ESPINO: Etude et Simulation de l'effet des contraintes sur la décomposition spinodale



Images de sonde atomique des atomes de Cr dans un alliage Fe-Cr-Ni-N après maintien de 1000 h à 425°C, sans chargement appliqué (a), avec un chargement uniaxial initial (80% limite d'élasticité) (b).

La microstructure issue de la décomposition spinodale a été caractérisée à la sonde atomique tomographique (SAT). Les figures ci-dessus (projection dans le plan d'une image 3D) ont été obtenues par ablation progressive de la matière, analyse (spectrométrie de masse) et comptage des atomes à partir d'une aiguille extraite du matériau vieilli. La distribution spatiale des éléments (ici le chrome) peut être reconstituée (chaque point représente un atome). Ces figures montrent une distribution isotrope des domaines riches en Cr dans le cas d'un traitement sans charge (a) alors qu'ils apparaissent allongés si le vieillissement est fait sous charge (b).



La modélisation par la méthode des champs de phase permet de reproduire les principales caractéristiques de la décomposition spinodale. Ce travail a fait l'objet de la publication mentionnée ci-dessus.

Le passage à des calculs sur alliages ternaires et multiconstitués, ainsi que l'intégration dans le code de simulation en champs de phase des contraintes mécaniques ont fait l'objet d'un travail post-doctoral. Le programme mis au point est en cours de test.

## ACCOTHS: Accommodation des Contraintes d'origine Thermique dans les polycristaux Hexagonaux par Ségrégation d'éléments interstitiels

Resp: Bruno Castanié  
ICA

## 3EI: Etude des Effets Environnementaux sur les Interfaces

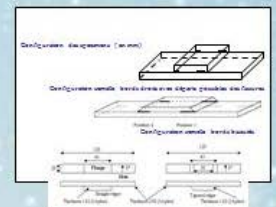
L'objectif de ce travail est d'étudier les effets environnementaux couplés, effet hydrique, thermique et mécanique sur les propriétés mécaniques des interfaces dans les stratifiés composites du type carbone/époxy utilisés dans les structures aéronautiques.

#### Contexte

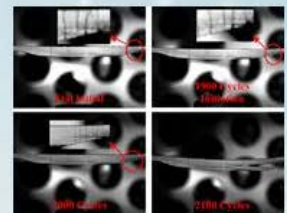
L'interface peau/radisseur est appréhendée en statique seulement



→ L'optimisation massique nécessite que les structures postflambent.  
→ Dans ce cas, il faudra calculer en fatigue les interfaces.  
→ Très peu de données à ce sujet dans la littérature



Flexion 4 points



#### Principaux Résultats:

##### Configuration Bords droits

→ L'initiation du délaminage se fait à l'interface peau/semelle pour l'ensemble des configurations.  
→ La fissure se propage lentement.  
→ Les interfaces orientées 45°/45° retardent l'initiation.

##### Vieillessement humide

→ Diminue significativement l'initiation du délaminage.  
→ Ne modifie pas les vitesses de propagation.

##### Configuration Bords bisautés

→ Ils retardent significativement l'initiation du délaminage /bords droits.  
→ Ils génèrent une vitesse de propagation supérieure/bords droits.

**Coordinateur :** Thierry Poinot (CERFACS)  
**Laboratoires participant :** CERFACS, ONERA  
**Début :** 2011 **Durée :** 3 ans

## 1. Contexte général

L'objectif de COFFECI était d'explorer la modélisation couplée «fluide/fluide», c'est à dire le couplage entre codes de mécanique des fluides dans le domaine des turbines à gaz : un code d'atomisation et un code d'écoulement. Ces méthodes sont génériques et peuvent s'appliquer à de nombreux autres domaines. Deux grands défis liés au calcul des turbines à gaz ont été abordés : le couplage compresseur/chambre/turbine, principalement mené au CERFACS, et la simulation de l'atomisation primaire dans un système d'injection de carburant liquide, étudié à l'ONERA.

## 2. Aspects novateurs du projet

Le principal aspect novateur de COFFECI était de démontrer que le calcul massivement parallèle et le couplage de codes appliqués à la mécanique des fluides dans les turbines à gaz étaient aujourd'hui non seulement des sujets d'importance académique mais qu'ils étaient aussi porteurs de développements d'intérêt industriel fort. L'optimisation des systèmes de combustion ne peut plus se faire de façon modulaire, élément par élément, mais nécessite une conception intégrée où tous les éléments de la turbine sont calculés de façon couplée. Ce qui pouvait sembler utopique il y a encore dix ans est aujourd'hui devenu une réalité que les concepteurs de turbine intègrent et veulent exploiter pour créer des moteurs plus compétitifs. Dans ce cadre, le passage par le calcul massivement parallèle et par le couplage de codes est aujourd'hui obligatoire.

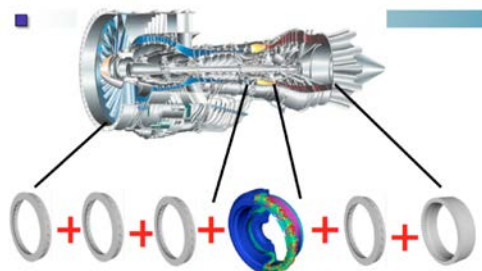


Fig. 1 : MISCOCG appliqué à un moteur complet

## 3. Principaux résultats

Concernant le premier objectif (principalement CERFACS), il fallait pouvoir coupler des domaines de calcul selon une méthode appelée MISCOCG dont le principe est le suivant : pour calculer une turbine, on la découpe en tranches suivant l'axe du moteur. Chaque tranche est maillée et calculée avec une instance AVBP. Les tranches sont couplées en temps réel par le coupleur ONERA/CERFACS appelé «OpenPalm», qui gère tous les échanges parallèles entre instances.

MISCOCG permet de calculer une machine tournante, mais permet aussi d'attaquer directement un calcul couplé chambre/turbine puisque c'est aussi AVBP qui est utilisé pour le calcul de la chambre. L'idée d'un calcul complet de turbine prend alors forme. Les outils COFFECI sont aujourd'hui utilisés par le CERFACS mais aussi à l'IMFT, à l'Université de Sherbrooke et à l'Institut Von Karman. Des installations de l'outil numérique sont prévues à l'Ecole Centrale de Paris et à l'Ecole Centrale de Lyon. COFFECI est un bon exemple d'outil ouvrant la voie à des simulations impossibles jusque-là, et pas uniquement à une amélioration des techniques en place.

Pour atteindre le deuxième objectif, l'ONERA/DMAE avait proposé de développer une méthodologie de couplage fluide/fluide pour simuler l'atomisation primaire de carburant alimentant une chambre de combustion. La problématique réside dans le caractère multi-échelle et instationnaire de ce type d'écoulement. En effet, on passe d'échelles de quelques centaines de microns à 1 mm, caractéristiques des systèmes d'injection, jusqu'à des tailles de quelques dizaines de microns voire microns

caractéristiques des brouillards de gouttelettes formés à l'issue de l'atomisation et ce sur des distances de quelques centimètres.

L'objectif initial de couplage fluide/fluide pour l'atomisation primaire a été atteint. Il reste cependant à pouvoir ultérieurement prendre en compte des géométries plus complexes afin de pouvoir insérer cet outil dans une chaîne complète de calcul de chambre de combustion.

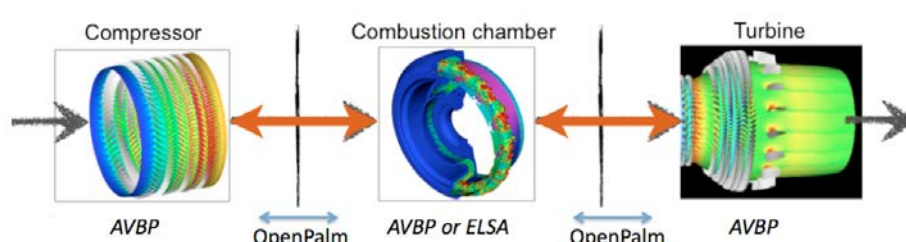


Fig. 2 : Calcul couplé d'une turbine à gaz

#### 4. Moyens et collaborations mis en place

La collaboration entre le CERFACS et l'ONERA a permis d'aborder les deux objectifs du projet, grâce aux compétences complémentaires.

#### 5. Retombées internationales

En juillet 2014, le CERFACS et l'Université de Sherbrooke ont travaillé conjointement à Stanford au «Center for Turbulence Research», avec les outils COFFECI sur la transmission d'ondes à travers un étage stator/rotor.

Depuis le début de 2014, l'institut Von Karman a demandé au CERFACS de pouvoir utiliser les outils COFFECI pour ses propres études.

#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

COFFECI a réussi plusieurs démonstrations pratiques suffisamment pertinentes pour que des industriels décident de tester les outils. Ceci a été fait pendant le projet Européen FACTOR, où les outils COFFECI ont servi à calculer une chambre « modèle » liée à une turbine simplifiée installée en Italie et au DLR (Allemagne). Le projet CN2020, qui a pour objectif de calculer des turbines en LES (Large-Eddy Simulation) en 2020 chez SAFRAN, comporte aujourd'hui un gros volet lié à AVBP et aux outils COFFECI. Enfin, pour la première fois en septembre 2014, TURBOMECA et SNECMA ont tous deux contacté le CERFACS et demandé des études de couplage chambre/turbine : ceci est une première et démontre la maturité des outils et le succès du projet, y compris d'un point de vue appliqué

Les niveaux de **TRL** des codes turbomachines développés au CERFACS sont passés de **1/2 à 4/5**.

Concernant la compréhension des phénomènes physiques propres à l'atomisation traités à l'ONERA, deux approches ont été menées, l'approche DNS (simulation numérique directe) se situe à un niveau de **TRL de 4**, et l'approche LES (simulation à grande échelle) à un niveau de **TRL de 8**.

#### 7. Suites au projet

Les outils COFFECI vont être employés pour d'autres applications que les turbines à gaz : la combustion à volume constant (CVC) avec le CRT SAFRAN sera par exemple développée sur la base de MISCOG en 2015 au CERFACS et au CRT. Dans ces modes de combustion pulsée, le couplage chambre/turbine est indispensable et seul MISCOG peut être employé. Enfin, MISCOG est déjà employé aujourd'hui pour des calculs de production, comme par exemple des calculs de sillage d'Ariane 5.

Un nouveau projet, SIMACO3FI, soutenu par le RTA STAE, va permettre de poursuivre ces études. L'objectif est le développement d'un injecteur numérique virtuel capable de donner de façon instationnaire la granulométrie de gouttelettes de carburant à injecter dans la chambre de combustion.

**Coordinateur** : Marianna Braza (IMFT)  
**Laboratoires participant** : IMFT, ISAE, LAPLACE  
**Début projet** : 2009 **Durée** : 3 ans

### 1- Contexte général

Ce projet pluridisciplinaire s'inscrit dans une démarche alliant les matériaux intelligents, de nouvelles approches de modélisation de l'interaction fluide-structure et des démonstrateurs électroactifs d'aéronefs. L'objectif principal du projet est l'optimisation des performances des drones en régime de fonctionnement réel grâce à l'application concrète du morphing. Visant à rassembler autour d'un même objet différentes spécialités scientifiques complémentaires, le projet propose l'utilisation de surfaces de morphing électroactif pour le contrôle en vol d'aéronefs.

### 2- Aspects novateurs de l'approche

- Partant d'une configuration « minimaliste » de nanodrone de type birotor contrarotatif (fig. 1), un nouveau concept d'interaction entre deux rotors coaxiaux, avec ou sans effet d'inclinaison des axes de rotation a été proposé, sur la base de muscles artificiels de la catégorie SMA (SmartServos) destinés à contrôler sur deux axes l'orientation de la tête du rotor supérieur. Le travail mené au sein d'EMMAV a montré l'intérêt de l'utilisation de polymères de type IPMC ou PVDF-beta en lien avec le laboratoire LAPLACE pour l'actuation.
- La mise en œuvre d'un micro-drone de type poussée vectorielle. Dans cette configuration, une nouvelle gamme d'actuateurs électroactifs développés en collaboration avec l'Université de Cergy a été envisagée sur un montage de type « rosace » pour articuler la tête rotor.
- L'étude du morphing pour des aéronefs de dimensions plus grandes, visant des applications d'ailerons déflecteurs d'un drone, des ailerons en aval du bord de fuite d'avion souple (fig. 2) de prochaine génération et en aval du bord de fuite de rotors souples a été effectuée.

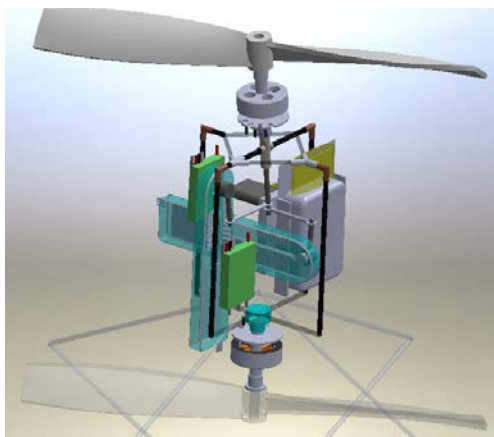


Fig 1 : Conception d'un nanodrone électro-actué.

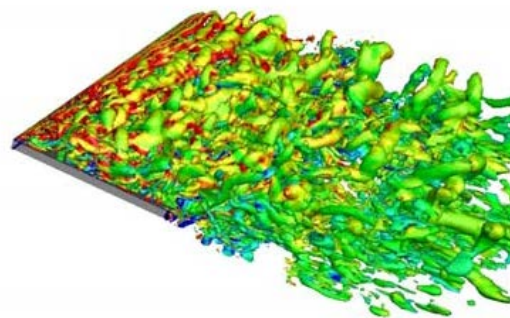


Fig.2 : Simulation de l'écoulement autour d'un volet déformable.

### 3- Principaux résultats

Les démonstrateurs élaborés au sein du projet EMMAV ont permis de mettre en évidence des concepts novateurs du morphing, tant sur l'échelle réduite de nano-drones et de micro-drones que sur des échelles d'ailerons d'avion en soufflerie (fig. 3). Ceci a permis de quantifier les capacités et les limitations des matériaux électroactifs intelligents utilisés pour la manoeuvrabilité des drones, l'efficacité en grandes déformations d'ailerons et leur actuation vibratoire en régimes dynamiques avec des charges aérodynamiques réalistes. Le projet EMMAV a ouvert ainsi des

perspectives intéressantes pour passer à des démonstrateurs en environnement 'réel', couvrant des dimensions miniatures de drones (activité soutenue par la DGA), jusqu'aux dimensions d'ailerons d'avion (partenariat avec Airbus-Toulouse).



Fig. 3 : Actuation d'une voilure par des câbles en alliage à mémoire de forme.

#### 4- Moyens et collaborations mises en place

Des collaborations ont été renforcées à l'aide du projet EMMAV avec l'ICA (Institut Clément Ader), l'IMT (Institut de Mathématiques de Toulouse) et l'ONERA (DCSD).

#### 5- Retombées internationales

L'ISAE a développé une collaboration avec les Universités de Floride, de Taiwan et de Munich suite aux invitations des Professeurs Thyopias, Albertani et Rüsser, respectivement. L'impact de l'invitation de 'chercheurs-senior' par le RTRA-EMMAV a été important pour le dépôt de brevet (ISAE) et la contribution au développement de logiciel pour l'interaction fluide-structure (IMFT-LAPLACE) à l'aide des invitations des Professeurs Rüsser et Thiele.

A l'aide du projet EMMAV, des collaborations au niveau européen ont été renforcées : une vingtaine d'instituts de recherche (tels que Imperial College, Tech. Univ. Berlin, Univ. Manchester, EPFL-Lausanne, entre autres) et d'industries (EDF, PSA, EADS, ...) sont intéressés à l'élaboration d'un projet européen sur le Morphing.

Le projet EMMAV a permis d'élaborer des partenariats européens importants, en ce qui concerne les approches de modélisation fluide-structures et les simulations numériques de haute performance au sein des projets européens du FP7 ATAAC (Advanced Turbulence Simulations for Aerodynamic Applications Challenges, 2009-2012) et TFAST (Transition location effects on shock-wave boundary layer interaction), 2012-2014 et la préparation de propositions de projet européen sur le morphing (projet EMORPH), incluant des industries de recherche européennes (Rolls Royce, Alenia, Dassault, entre autres).

La présentation des activités EMMAV au sein de la Commission gouvernementale des USA mandatée par la NSF (National Science Foundation) au cours des années 2010-11, a permis de développer des collaborations avec le MIT et l'Univ. de Brown (USA).

#### 6- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le niveau de TRL atteint à la fin du projet est estimé au niveau 2/3. En effet, les concepts technologiques ont été formulés, des méthodologies ont été mises en place, les matériaux ont été caractérisés et des preuves expérimentales des principales caractéristiques du concept ont été montrées (en soufflerie), tant au niveau des drones que des voilures.

#### 7- Suites au projet

On doit citer, le chantier SMARTWING et son projet DYNAMORPH, soutenus par le RTRA, ainsi que le projet de plate-forme ANR 'EMORPHING' incluant une dizaine de partenaires et un comité d'orientation industrielle auquel participe des représentants d'Airbus.

Des entreprises du domaine aéronautique (Airbus), de l'industrie automobile (PSA) et de modélisation de haute performance (EXA) ainsi que le bassin des carènes national (DGA) ont sollicité des partenaires du projet EMMAV pour élaborer des projets applicatifs plus ciblés.

**Coordinateurs :** Robert Bazer-Bacchi (IRAP) et Francis Collombet (ICA)

**Laboratoires participant :** IRAP, ICA, Phase, LAAS

**Début du projet :** 2008      **Durée :** 3 ans

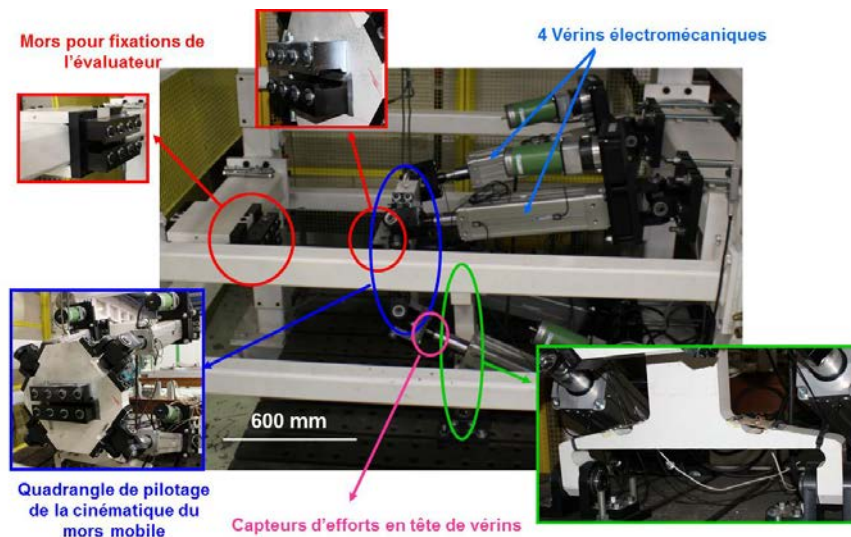
## 1- Contexte général du projet :

L'idée initiale est que le nombre de structures composites epoxy /fibres de carbone de dimensions industrielles, instrumentées pour connaître en temps réel l'état de la structure est très faible. Le contexte général du projet se situe dans le « Structural Health Monitoring ». Pour atteindre cet objectif plusieurs verrous de nature technologiques ou scientifiques doivent être franchis :

- Construire une « machine de torture » permettant de solliciter des éprouvettes de taille significatives pour une utilisation dans le domaine aéronautique.
- Trouver les bonnes technologies pour introduire des capteurs qui vont devoir résister aux contraintes (thermiques -180°C- et pression-7 Bars-) de la mise en œuvre du composite
- Prouver que l'introduction du capteur ne constitue pas en lui-même le défaut qui conduira aux contraintes.
- Etablir la bijection entre les informations délivrées par le capteur et la nature d'un défaut éventuel et sa dangerosité.

## 2- Aspects novateurs du projet

- Une machine pilotée pour la sollicitation de pièces de dimensions significatives.
- Conception, réalisation et introduction de capteurs basés sur différents principes et répondant simultanément.



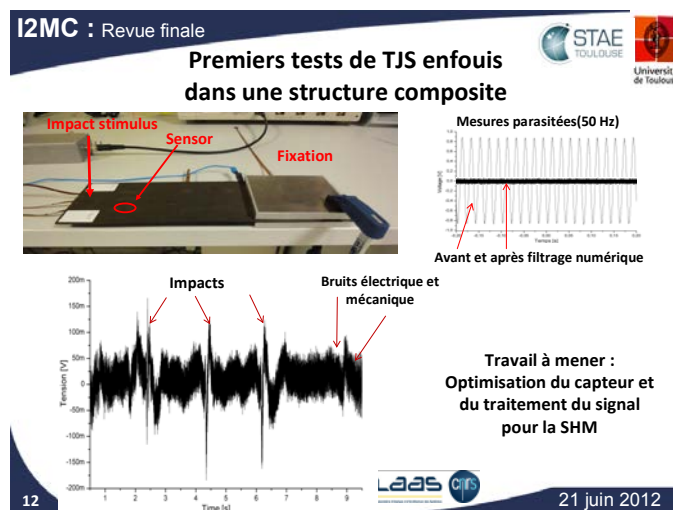
## 3- Collaborations mises en place dans le projet :

Une collaboration inédite a été mise en place entre :

L'ICA chargé de la mise en œuvre du composite et de l'inclusion des capteurs ainsi que de la conception et réalisation de la machine de test multiaxes ; Le LAAS et Phase chargés de la réalisation de deux types de capteurs résistants aux conditions d'élaboration du composite et l'IRAP chargé de l'interfaçage avec les capteurs et de la commande de la machine de test.

#### 4- Résultats acquis

- Une machine instrumentée sollicitant des échantillons de grande taille (50cm de coté) pilotée par ordinateur est opérationnelle. Les deux types de capteurs LAAS et PHASE ont été conçus et la preuve de la possibilité de les insérer dans le composite lors de sa fabrication a été donnée. Le capteur du LAAS est un composant sensible à la température et aux contraintes mécaniques ; le capteur de PHASE est un transducteur ultrason.
- Pour les capteurs ultrasons, leur intérêt s'est déplacé au cours de l'étude vers leur utilité pour le suivi de la polymérisation et sont associés au moule de fabrication plutôt qu'à la pièce moulée elle-même.
- Si l'on rajoute des tests avec des capteurs réalisés par le biais d'une collaboration avec l'IMI qui réalise des capteurs ultrasons résistant jusqu'à 400°C le projet a permis de monter sur la même pièce trois types de capteurs différents.
- De nombreux essais montrent que le départ des défauts n'est pas lié à la présence du capteur.
- Traitement par éléments finis de l'imagerie Ultrasons



#### 5- Retombées internationales

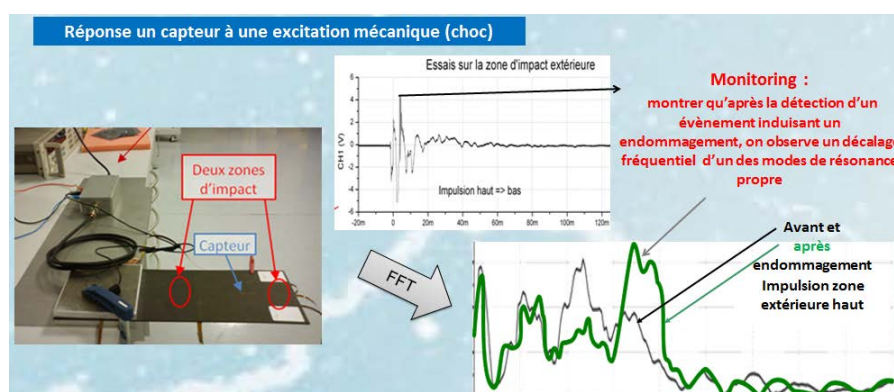
La collaboration avec l'IMI (Institut des Matériaux Industriel au Québec) a permis la livraison et les tests de validation de capteurs Ultra sons haute température ( 400°C)

Dans la dernière année du projet , collaborations avec un labo de l'université de Ghent et avec COM & SENS en Belgique.

Via thésards et post docts, le projet a été mené en collaboration avec le National Polytechnic Institut de Mexico.

#### 6- Potentiel applicatif et estimation des TRL

Le niveau de TRL atteint à la fin du projet est estimé au **niveau 5** pour ce qui concerne la technologie d'enfouissement et les pièces prototypes qui ont été validées en environnement représentatif et au **niveau 3/4** pour les aspects « systèmes ».





**Coordinateur** Marc Montagnac (CERFACS)

**Laboratoires participant** : ONERA, IMT, ICA, CERFACS

**Début projet** : 2010

**Durée** : 3 ans

## 1- Contexte général

Dans un souci de réduction de coûts et d'impacts sur l'environnement, les industries aéronautiques ont de plus en plus recours aux matériaux composites pour alléger leurs appareils. Les phénomènes de couplage aérodynamique-structures sont donc à prendre en compte plus tôt dans la phase de conception.

Le projet comportait deux objectifs majeurs :

- fédérer quatre laboratoires régionaux afin d'initier une réflexion sur des stratégies numériques d'optimisation multidisciplinaire d'une aile d'avion dans un contexte industriel (figure 1).
- perfectionner les composants d'optimisation monodisciplinaire et créer éventuellement des outils transversaux pour permettre une convergence graduelle vers l'optimisation multidisciplinaire.

## 2- Aspect novateur de l'approche

L'aspect le plus novateur est de concevoir une méthodologie de collaboration entre plusieurs disciplines (mécanique des fluides et mécanique des structures) autour de l'utilisation d'outils numériques pour la conception et l'optimisation multidisciplinaire.

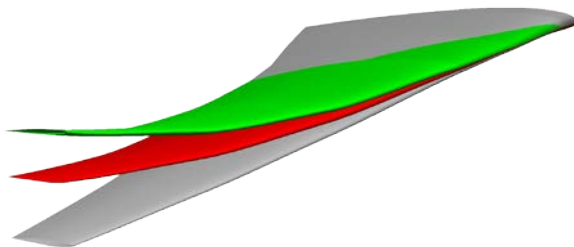


Fig 1 : Formes d'une aile soumise à différentes conditions de vol au cours d'une mission.

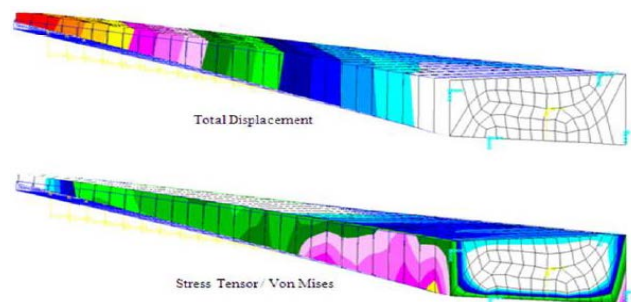


Fig.2 : Résultat de l'optimisation d'un caisson métallique.

## 3- Principaux résultats

Le projet a mis en place des outils au niveau de chaque discipline (CFD, CSM, algorithmes) et une méthode multi-niveaux et distribuée pour le couplage entre les disciplines.

En particulier, des métamodèles ont été développés pour réduire les coûts en temps de calculs et échanger les données entre disciplines. Des résultats de structures composites (fig. 2) et d'optimisation aérodynamique (figure 3) ont été obtenus montrant des gains significatifs en

performance. Un volet de prise en compte des incertitudes paramétriques dans le dimensionnement d'une structure a aussi été abordé.

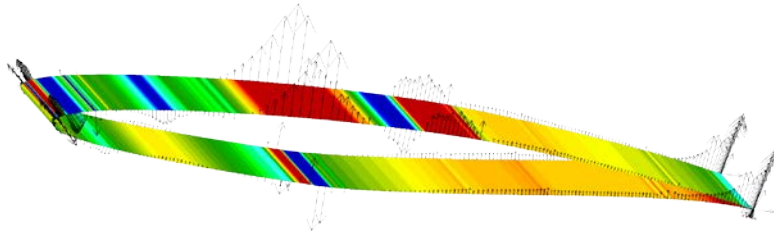


Fig. 3 : Sensibilité de la fonction objectif par rapport à la forme.

#### **4- Moyens et collaborations mises en place**

L'aspect collaboratif était au cœur du projet pour mettre en place une méthode d'optimisation multidisciplinaire multi-niveaux, collaborative et distribuée. Le séminaire de restitution a permis de présenter les différentes briques du projet en vue de prolonger le travail avec un partenaire industriel (AIRBUS).

#### **5- Retombées internationales**

La venue de l'expert Luis Vicente financée par la fondation en début de projet a permis d'initier une collaboration avec l'université de Coimbra (Portugal).

#### **6- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif**

Les modèles utilisés dans le cadre du projet sont encore simplifiés par rapport aux modèles utilisés dans l'industrie. Il faut encore poursuivre la démarche pour qu'elle soit entièrement fonctionnelle et validée.

Une démarche de même nature est suivie chez Airbus : MDA-MDO.

#### **7- Suites au projet**

Même si un certain nombre de méthodologies doivent encore être testées et validées, les outils développés permettent d'envisager quelques applications. Une suite peut être envisagée pour continuer à développer les méthodologies actuelles dans le but de produire une plateforme MDO pérenne. Dans ce cadre, une collaboration plus étroite avec des industriels doit se rapprocher de cas tests plus réalistes. La piste privilégiée pour poursuivre ce travail est d'intégrer un projet soutenu par l'IRT. Cette solution aurait le double avantage de réunir dans un même lieu et en même temps les différents experts concernés par les thématiques choisies.

## Systèmes embarqués

- CASA
- FDAI-UV
- PLASMAX
- ROSACE
- SYMIAE
- TOAST



**Coordinateur :** Jean-André SAUVAUD (IRAP/OMP)  
**Laboratoires participant :** IRAP/OMP et LAAS/LOSE  
**Début projet :** 2008      **Durée :** 3 ans

### 1. Contexte général

L'environnement ionisé de la Terre est perturbé par des précipitations intenses de particules chargées (ions et électrons) généralement associées aux éruptions solaires. Celles-ci sont nuisibles au bon fonctionnement des systèmes embarqués sur les satellites artificiels. Cela exige de réaliser des mesures in situ complexes afin d'en déterminer les principales caractéristiques (densité, spectre énergétique,...).

Les performances de la chaîne de mesure sont notamment liées à celles du circuit de lecture employé, qui transforme la charge reçue en impulsion de tension (CPA), met en forme, filtre et amplifie ce signal (PS) et en assure la conversion analogique/digitale (ADC), en interface avec les calculateurs de bord. Ces chaînes de mesure sont spécifiques aux types de détecteurs utilisés pour les électrons et les ions (Fig. 1).

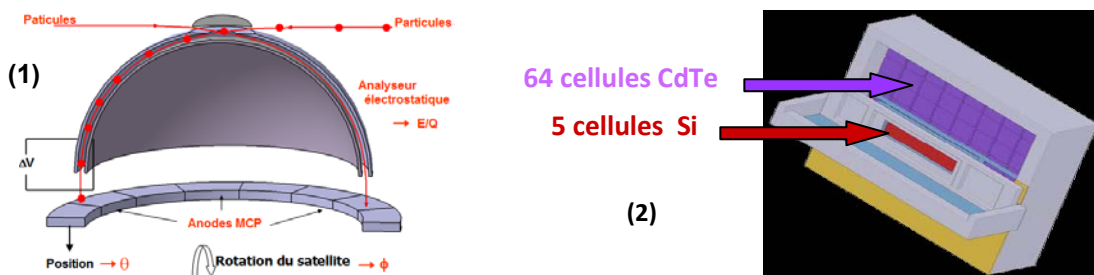


Fig. 1 : (1) détecteur « top-hat » : guidées par le déflecteur électrostatique, les électrons d'une incidence et d'une énergie sélectionnées impactent des galettes à micro-canaux (MCP) qui amplifient la charge ; (2) spectromètre « Si / CdZnTe » : la coïncidence des signaux induits dans deux barrettes de semi-conducteurs pixellisées détermine l'incidence, et la réponse différentielle des deux matériaux, l'énergie, des ions impactant

### 2. Aspects novateurs de l'approche

Grâce à la réduction de la taille des gravures sur les substrats de Si, les microélectroniques « durcies aux radiations » peuvent aujourd'hui être remplacées par des technologies CMOS/BiCMOS standard moins coûteuses, plus performantes, d'accès plus facile et permettant un haut niveau d'intégration. CASA avait pour principal objectif la mise au point d'ASIC multivoies (typiquement 16 voies), utilisant une technologie CMOS 0,35  $\mu\text{m}$ , permettant la lecture simultanée de tout ou partie des pixels des deux détecteurs utilisés (fig.2)

### 3. Principaux résultats

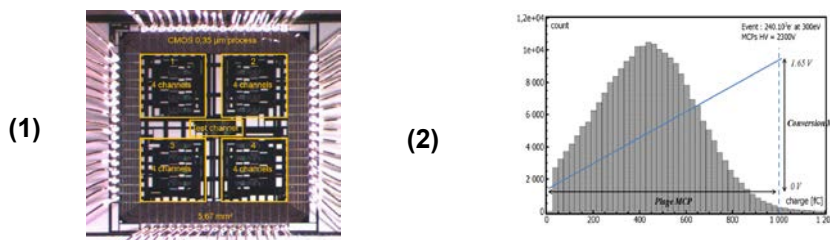


Fig. 2 : Performances de l'ASIC pour MCP, photographié en (1) : (2) réponse en charge de la MCP et linéarité de la chaîne de mesure (en bleu)

Les principales caractéristiques de l'ASIC 16 voies CDIC 16 de la chaîne de détection des MCP, entre la réponse probabiliste de la MCP jusqu'à la réponse finale linéaire du système, après mise en forme de l'impulsion reçue, à chaque étage de l'électronique sont indiquées ci-dessus (fig.3).

Pour ce qui concerne la détection de l'énergie des ions par une mesure différentielle Si/CdZnTe, une modélisation (code Geant 4) a permis de distinguer les lois de probabilité différentes de création de paires électrons-trous dans Si (en rouge) et CdZnTe (en bleu) en fonction de l'énergie des électrons incidents. L'électronique permet alors le signal différentiel correspondant en information digitalisée (Fig. 4).

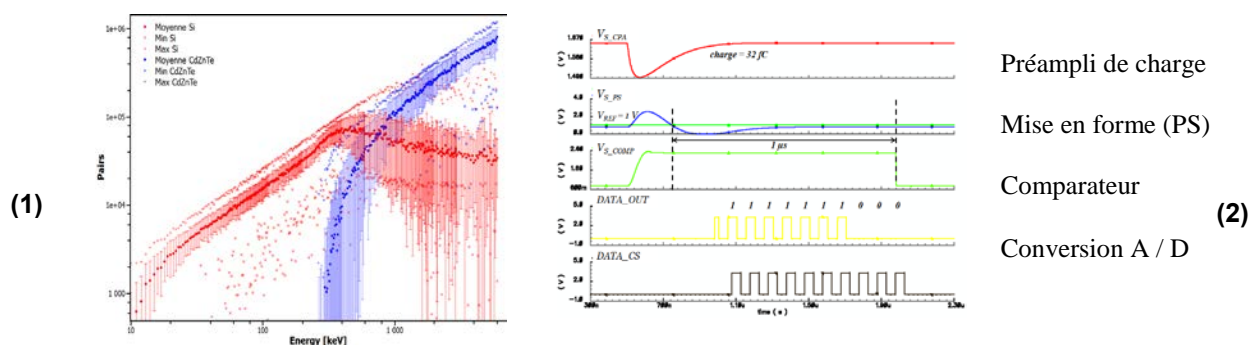


Fig. 3 : Performances de la chaîne pour détecteurs Si / CdZnTe: (1) simulation Monte-Carlo de la production de paires électron-trous vs. l'énergie des électrons dans des cibles de Si (en rouge) et CdZnTe (en bleu), (2) réponse des différentes étapes de la chaîne de mesure.

#### 4. Moyens et collaborations mises en place

La principale collaboration du projet, inédite, est celle entre les équipes de l'IRAP et celles du LAAS/LOSE. Elle a mobilisé environ 7 permanents (pour 1 ETP environ), un doctorant CNES à temps plein. Le projet a bénéficié du recrutement de 2 Ingénieurs. Outre la réalisation de démonstrateurs de laboratoire, le projet a donné lieu à 2 articles de revue et une présentation dans un atelier international, organisé à Toulouse.

#### 5. Retombées internationales

Ses performances s'étant avérées supérieures à celle des produits du marché, l'ASIC 16 voies CDIC16 a été livré au Space Science Laboratory de Berkeley-Université de Californie pour tests et inclusion dans les spectromètres de particules de la mission américaine SOLAR PROBE+ qui s'approchera du soleil à 7 rayons solaires. Son utilisation est aussi envisagée pour les spectromètres de la mission européenne Solar Orbiter. Enfin, une version adaptée aux channeltrons sera proposée pour la mission vers Jupiter « Laplace » de l'agence spatiale européenne.

L'ASIC 13 voies pour la mesure du nombre et de la hauteur des impulsions délivrées par de particules énergétiques a été choisi pour instrumenter l'expérience IDEE à bord du satellite national TARANIS (Tool for the Analysis of RAdiations from lightNINGs and Sprites).

#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le niveau de TRL atteint au cours du projet CASA est estimé à **4/5**. Les ASIC ont été validés en laboratoire ce qui correspond au niveau 4, puis seulement partiellement validés en environnement représentatif. Au-delà du succès technique CASA a permis de construire un savoir-faire commun, qui doit être pérennisé, par exemple par des thèse financées par le CNES, entre utilisateurs de détecteurs et développeurs de circuits électronique.

Grâce à des collaborations nationales (CNES) et internationales (JAXA au Japon et Space Science Laboratory, à l'Université de Berkeley) les chaînes de mesure développées pourront bénéficier de très intéressantes opportunités de vol. Les caractéristiques des senseurs ainsi développés, leur encombrement, leur consommation, comme leurs excellentes performances en feraient des outils de choix pour le contrôle des systèmes embarqués sur les satellites opérationnels de télécommunication et/ou d'observation de la terre. Des applications aux domaines nucléaire, médical (accélérateurs de particules), ou aéronautique (meilleure connaissance de l'environnement radiatif) pourraient être envisagées.

Grâce à de meilleures performances, et après une montée en TRL, les Asics développés pourraient également s'avérer des concurrents sérieux des amplificateurs de charge de type AMPTEK.

**Coordinateur** : Laurent Koechlin (IRAP/OMP)

Seul projet retenu en mono-laboratoire.

Début du projet : 2009

Durée : 2 ans

## 1- Contexte général

L'objet du projet FDAI-UV est de contribuer à la réalisation d'une phase de recherche et de développement critique, nécessaire pour valider un concept de mission spatiale proposée dans le cadre du plan « Cosmic Vision » (2015-2025) de l'ESA.

La mission proposée consiste en un imageur astronomique dans l'ultraviolet (pour des raisons astrophysiques, couvrant la raie Ly alpha de l'Hydrogène à 121 nm et allant jusqu'à 200 ou 250 nm). Celui-ci serait constitué d'un ensemble de deux satellites, orbitant en formation, autour du point de Lagrange L2. L'un d'entre eux transporte le primaire, une « lentille grille » de Fresnel de grande dimension (4m x 4m) et de grande focale (d'environ 10 km, variant avec la longueur d'onde d'observation). L'autre porte une lentille de champ pour le guidage et un miroir de Fresnel focalisé sur un bloc détecteur (Fig. 1). Le système a fait l'objet d'une phase 0 au CNES.

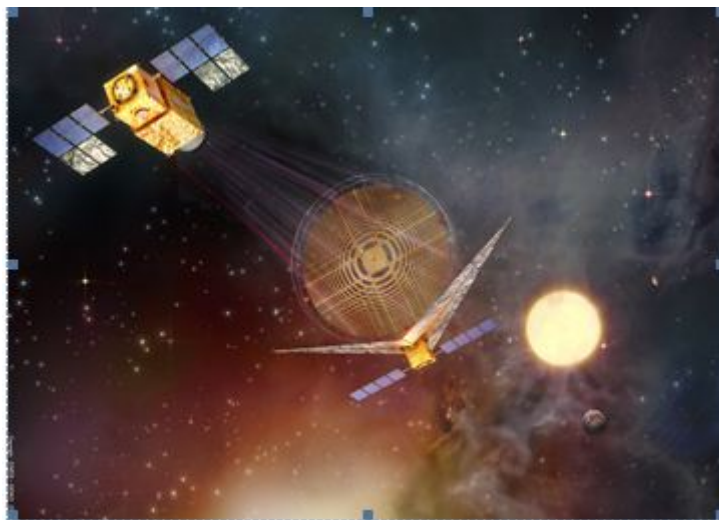


Fig.1 : Vue d'artiste de la mission FDAI-UV. La grille de Fresnel est protégée des rayons du soleil par un baffle.

## 2- Aspects novateurs de l'approche

L'utilisation d'une lentille de Fresnel dans l'UV est un challenge en observation spatiale. Les travaux du projet FDAI-UV portent principalement sur la faisabilité et les performances des deux pièces optiques diffractives, grille primaire et miroir secondaire, opérant sur des ordres de diffraction inversés (+1 pour la lentille, et - 1 pour le miroir), afin de réduire les effets de chromaticité du système optique.

Le miroir secondaire diffractif est obtenu – en séries de marches - par gravure chimique sur un substrat en silice fondue selon un motif transmis par photo-lithographie (procédé SILIOS Technologies). La rugosité de la surface gravée est ensuite atténuée par un polissage magnéto rhéologique (procédés SESO), comme l'indique la caractérisation de celle-ci, opérée par microscopie à force atomique au Laboratoire d'Expertise du CNES.

### **3- Collaborations mises en place**

Des collaborations ont été mises en place avec des entreprises impliquées dans la R&D : Micro Unisage Laser, SILIOS Technologies et SESO. Elles ont donné l'opportunité à ces entreprises de développer un savoir-faire original.

### **4- Principaux résultats**

Une grille de Fresnel primaire (200x200 mm, 696 zones) a été réalisée, puis montée sur un tube de lunette astronomique pour validations optiques sur le ciel, dans le visible et proche IR. Les résultats obtenus sur divers objets célestes ont été particulièrement satisfaisants. Ils ont permis de mettre en évidence la qualité de l'optique diffractive et sa dynamique photométrique (6,2 10<sup>-6</sup>).

Si le projet FDAI-UV n'a pas pu aller jusqu'au bout de l'objectif assigné à une phase 1 (TRL 4 au moins) d'une agence spatiale, il a permis d'améliorer les procédés de fabrication des pièces optiques majeures du système, et d'introduire ceux-ci dans les pratiques technologiques de trois PME. Les tests réalisés ont permis de valider les concepts optiques proposés et d'ouvrir la voie à une exploration nouvelle de l'Univers lointain, dans une gamme de longueur d'onde encore inusitée avec ces performances.

### **5- Retombées internationales**

Plusieurs collaborations internationales ont été initiées,

- dans le domaine des formations de systèmes exoplanétaires, avec l'Espagne (Univ Universidad Complutense, Madrid),
- sur la physique stellaire en UV avec les Etats-Unis (Harvard Smithsonian center for astrophysics, Cambridge),
- pour l'étude des astéroïdes binaires avec l'imageur de Fresnel, avec les Etats-Unis (Southwest Research Institute, Boulder).

### **6- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif**

Si le projet FDAI-UV n'a pas pu aller jusqu'au bout de l'objectif assigné à une phase 1 (TRL 4 au moins) d'une agence spatiale, il a permis d'améliorer les procédés de fabrication des pièces optiques majeures du système, et d'introduire ceux-ci dans les pratiques technologiques de trois PME. Les tests réalisés ont permis de valider les concepts optiques proposés et d'ouvrir la voie à une exploration nouvelle de l'Univers lointain, dans une gamme de longueur d'onde encore inusitée avec ces performances.

Le niveau de TRL atteint par le projet FDAI-UV a été estimé à :

- **4** pour la grille de Fresnel primaire, le correcteur chromatique visible et l'articulation des deux modules
- **3** pour le correcteur chromatique UV et le déploiement du support de la grille primaire.

### **7- Suites au projet**

Pour une future mission spatiale potentielle, il aurait fallu atteindre un TRL de 5 (et non de 4) pour postuler à un programme spatial. Faute de financement actuellement, les équipes se focalisent sur le renforcement des collaborations internationales.



**Responsables du projet :** Florent Christophe (ONERA)

**Laboratoires participant :** Laplace, IMT, ONERA

**Début du projet :** mars 2008      **Durée :** 3 ans

## 1- Contexte général du projet :

Dans un certain nombre de situations ou de dispositifs, des microondes interagissent avec un milieu partiellement ionisé (plasma) qui, peut-être le siège de transport hydrodynamique régi par les équations de la mécanique des fluides (Navier Stokes). Le couplage entre les équations de Maxwell et de Navier Stokes est un défi considérable qui n'est que très partiellement résolu dans quelques cas particuliers.

Ce projet aborde cette question pour trois situations physiques riches en potentialités d'applications :

- Le claquage microonde
- La création d'un plasma dans un écoulement supersonique
- Les dispositifs d'antennes reconfigurables

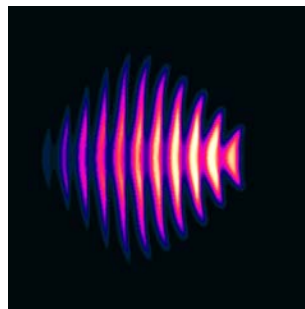
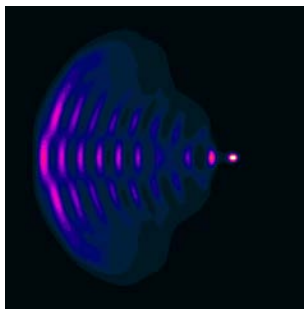
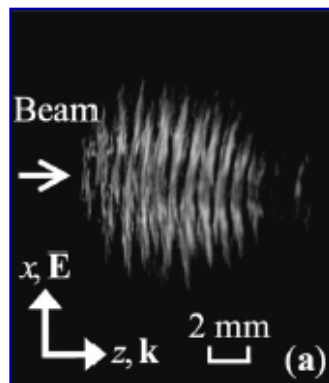
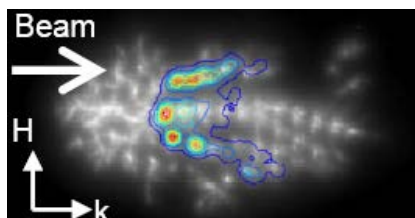


fig.1 : Simulations (en haut)  
d'un claquage atmosphérique  
dans les conditions  
d'expérimentations (en bas)



## 2- Aspects novateurs du projet

Les aspects novateurs tiennent au fait que des chercheurs de mathématiques appliquées ont collaboré avec des physiciens d'une part et des ingénieurs ayant le souci de l'application ou de la « fonction » d'autre part.

- Les auteurs ont expliqué clairement pour la première fois les phénomènes d'auto organisation d'un plasma (raies lumineuses alternant avec des espaces sombres) d'un plasma microonde entretenu à la pression atmosphérique.
- Modèle prenant en compte le couplage Mécanique des fluides et plasma d'une part et physique des plasmas et électromagnétisme d'autre part. Modèle axisymétrique 2D du dispositif microonde. En fait, simulation d'une « perche » électromagnétique qui serait un plasma plutôt qu'une perche réelle.
- Des approches numériques novatrices, en particulier pour la modélisation de plasmas magnétisés ou dans le cas de plasmas fortement hétérogènes.

- La maîtrise de la création ou de l'extinction d'un plasma modifie localement les propriétés électromagnétiques de l'espace. L'aspect novateur est l'utilisation de cette possibilité pour créer des fonctions de filtres reconfigurables.
- La mise en œuvre de sources d'électrons très basse énergie (quelques eV) pour étudier l'émission secondaire de diverses surfaces sous l'action de ce bombardement électronique basse énergie.

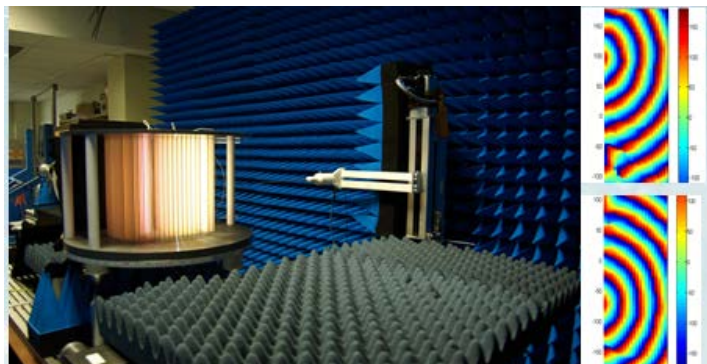


Fig. 2 : Méta-matériau 2D dans l'installation de mesure et fronts d'onde mesurés en sortie selon la polarisation de 2 capillaires plasma et la fréquence de l'onde

### 3- Collaborations mises en place dans le projet :

- Une vingtaine de chercheurs allant des mathématiques à la physique et à l'électromagnétisme dont certains n'avaient jamais collaboré ont travaillé en synergie au cours de ce projet

### 4- Résultats acquis

La plupart des résultats acquis sont la conséquence des aspects novateurs décrits plus haut.

Il faut en particulier retenir :

- Des modèles et simulations originaux (avec temps de calcul raisonnables) lors de la propagation d'onde dans un milieu plasma soit préexistant soit créé par l'onde elle-même. Développement d'idées sur le blindage « déclanchable » contre les agressions électromagnétiques.
- Simulation d'un plasma cylindrique de quelques micromètres de diamètre dans un écoulement supersonique.
- Filtrés et métamatériaux reconfigurables : maquettes de structures à bande interdite électromagn. Donc : approche simulation avec validation expérimentale.
- Des courbes quasi uniques donnant le rendement d'émission d'électrons secondaires de matériaux tels que graphite ou diamant polycristallin sous bombardement d'électrons très basse énergie de l'ordre de 3 à 5 eV.

### 5- Retombées internationales :

Au cours du projet, plusieurs collaborations internationales ont vu le jour via les invitations de séniors :

- Duke university, Iowa state university, University of Wisconsin, University of Wisconsin, University of Ferrara (Italie)
- Invitation d'un chercheur toulousain au workshop organisé à Princeton sur le futur des plasmas à pression atmosphériques faiblement ionisés – contrôles d'écoulements et « materials processing ».
- Contacts prévus par l'ONERA avec Tokyo University sur les métamatériaux reconfigurables.

### 6- Potentiel applicatif et estimation des TRL

Le niveau de TRL est assez différent selon les parties du projet. Il est de 2 à 3 pour la partie concernant le claquage microonde et ses applications et 3 à 4 pour la partie concernant les antennes reconfigurables par création d'un plasma.

**Coordinateur : Rachid Alami (LAAS)**

**Laboratoires participant : IRIT, LAAS-CNRS, ONERA**

**Début du projet : 2008**

**Durée : 3 ans**

## 1. Contexte général

Le projet ROSACE vise à étudier et développer les moyens de conception, de spécification, d'implémentation et de déploiement d'un ensemble de robots mobiles autonomes communicants et coopératifs possédant des propriétés établies et vérifiables notamment en termes de sécurité, d'auto diagnostic et de reconfiguration, ainsi que des capacités d'auto-adaptation dans des environnements dynamiques. Le projet est focalisé sur les méthodes et outils logiciels (modèles, algorithmes, systèmes). Il a contribué au développement d'une approche systématique de la construction de tels systèmes avec une prise en compte explicite des contraintes temps réel ainsi de celles relevant de la communication.

Le projet a porté sur deux aspects :

- a) La coordination autour de la problématique de conception, spécification, implémentation et déploiement d'un ensemble de robots mobiles autonomes communicants et coopératifs.
- b) Le développement et la mise en œuvre d'un outil commun, à savoir le simulateur MORSE (Modular OpenRobots Simulation Engine).

## 2. Aspects novateurs du projet

L'aspect le plus novateur et le plus structurant concerne le développement d'une plate-forme de simulation robotique (MORSE). Parmi les facteurs clés il faut souligner l'ouverture et l'interopérabilité : l'approche est indépendante de l'intergiciel (*middleware*) et des composants d'architecture. Ainsi, le simulateur est interfaçable avec les systèmes les plus courants : ROS, Yarp, Genom, MOOS, etc.



Le robot mobile autonome MANA du LAAS-CNRS

## 3. Principaux résultats

Le premier point a permis la définition d'un scénario détaillé mettant en œuvre le déploiement d'un ensemble de robots autonomes communicants en situation de crise. Ce travail a permis également d'identifier les verrous scientifiques.

Le deuxième point a porté sur la spécification et le développement d'un simulateur multi-robot ouvert (*open-source*) fondé sur des standards de simulation géométriques et physiques récents et eux-mêmes *open-source*. Le développement de la plateforme de simulation robotique MORSE (*Modular OpenRobots Simulation Engine*), est aujourd'hui un succès avéré. L'ensemble des développements sont *open-source* et MORSE peut être exploité pour simuler des scénarios dans une variété d'environnements. Il est maintenant utilisé dans le monde entier par une centaine de personnes, et son développement continu implique des personnes d'une douzaine de laboratoires.

Les principaux résultats obtenus dans le cadre des thématiques couvertes concernent :

- les aspects sûreté de fonctionnement et aspects diagnostic ;
- les techniques de prise de décision distribuée au sein d'une flotte hétérogènes ;

- les systèmes de coopération multi-agents ;
- la mise en place des architectures robotiques et les premières démonstrations en temps réel de briques fonctionnelles sur scénarios de coordination entre différents agents.

#### 4. Moyens et collaborations mises en place

Le développement de ce projet a permis d'affermir les coopérations entre trois laboratoires du site sur une large palette d'activités. La synergie ainsi créée a aussi impliqué conjointement plusieurs équipes du LAAS.

Les coopérations internationales qui ont résulté dans les projets issues de ROSACE sont également à souligner.



Simulation dans MORSE de l'intervention de plusieurs robots mobiles autonomes communicants

#### 5. Retombées internationales

Le projet ROSACE a permis d'avancer et d'approfondir les collaborations avec plusieurs universités et laboratoires. Citons notamment : l'Université de Zaragoza (Prof. Luis Montano) ; l'Université de Séville (Prof. Anibal Ollero) ; le centre FADA-CATEC de Séville ; le Max Planck Institute de Tübingen (Prof. Bulthoff) ; le DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) de Munich et notamment les équipes de Alin Albu Shaffer et de Konstantin Kondak et l'Université de Catalogne à Barcelone (UPC, Prof. Sanfeliu).

#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Au niveau des aspects amonts les résultats obtenus sur l'architecture des systèmes se situent à un TRL 3/4.

Au niveau des réalisations telle que le tracking d'un objet volant dans un environnement inconnu, le niveau de TRL atteint est estimé en moyenne à TRL 5 (validation de composants et/ou de maquettes en environnement représentatif).

En ce qui concerne l'outil de simulation MORSE, le TRL atteint estimé est TRL 7/8, l'outil est aujourd'hui pérenne et est notamment utilisé par plusieurs projets nationaux (projets ANR) et européens (FP7).

#### 7. Suites au projet

Le projet ROSACE a donné lieu à plusieurs suites :

Le projet H2020 Cyber Physical System Labs (CPSELABS) : le LAAS et l'ONERA poursuivent dans le cadre du projet européen Cyber Physical System Labs (qui débutera en 2015) les travaux sur la sécurisation des systèmes mobiles autonomes en collaboration avec des laboratoires européens : Suède, Allemagne, Angleterre et Espagne.

Le projet H2020 AEROAMS : au sein du thème Robotique du LAAS, l'équipe RIS (Robotique et InteractionS) sera fortement impliquée dans ce projet, qui doit démarrer en juin 2015, et qui mettra en œuvre des UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) en interaction physique (contact, force) avec des hommes.

Le projet Skyscanner et le chantier SYCYPH (*Multidisciplinary design of cyber-physical systems*) — tous deux soutenus par le RTRA — s'appuient notamment sur des travaux réalisés dans le cadre de ROSACE.

Il en est de même du projet Agridrones Services (financement FUI) qui prévoit le déploiement de flottes de drones pour des applications agricoles.

**Responsables du projet :** Robert Plana (LAAS)  
**Laboratoires participant :** LAAS, LAPLACE, CIRIMAT  
**Début du projet :** 2008      **Durée :** 3 ans

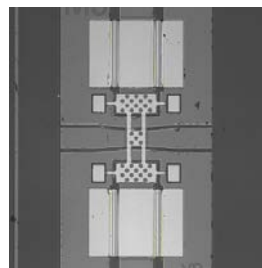
## 1. Contexte général

Il s'agit de concevoir une nouvelle génération de puces électroniques susceptible de constituer des «senseurs», de dimension millimétrique, associant capteurs de signaux divers et émetteurs miniaturisés, ces derniers pouvant transmettre à distance les données recueillies par les premiers. L'objectif est *in fine* de développer des réseaux de senseurs « sans fils » pour des systèmes de suivi médicaux ou environnementaux, des réseaux de communications à haut débit ou encore des imageurs à haute résolution, en ondes millimétriques.

## 2. Aspects novateurs de l'approche

En amont de telles applications, SYMIAE explore les potentialités de l'intégration hétérogène de Systèmes « Micro électromécaniques » Radio Fréquence (acronyme anglais RF-MEMS) avec des circuits intégrés (technologie CMOS à 65 nm). Dans cette perspective, le projet SYMIAE a conjugué quatre types d'études : élaboration de nouveaux matériaux, procédés de fabrication, conception de circuits individuels et implémentation de systèmes complets. En matière de « circuits », le projet s'est concentré sur le développement d'actuateurs dont le fonctionnement est basé sur l'accroissement rapide des forces exercées par un matériau piézo-électrique à sa fréquence de résonance (figure 1). Ces actuateurs connectent et déconnectent alternativement les éléments du réseau déphaseur, induisant ainsi le contrôle du faisceau d'émission réception (« beam steering »).

Figure 1 : interrupteur élémentaire de l'actuateur de codage du RF-MEMS développé dans SYMIAE



Les MEMS sont couplés à des émetteurs-récepteurs (transceiver) opérant dans la gamme millimétrique (100 GHz). L'ensemble (figure 2) constitue la brique de base, qui peut alors être distribuée et actionnée en réseau, d'une interface radio reconfigurable, utilisant la technique dite « ultra large bande par impulsions » (Impulse Radio – Ultra Wide Band ou IR-UWB). Elle émet des impulsions EHF de courte durée, avec une période et un taux de charge pseudo aléatoires, afin de transmettre des informations à haut débit, avec un faible coût énergétique, dans un contexte « Multi-Utilisateurs ».

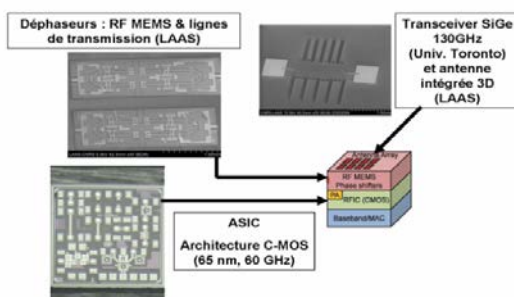


Figure 2: Architecture du microsysteme élémentaire SYMIAE: un empilement comprenant, de bas en haut, un étage CMOS, un circuit codeur/déphaseur (RF-MEMS) et un « transceiver » finalement connecté à une antenne dipôle

### 3. Principaux résultats

SYMIAE a joué un rôle précurseur d'accélérateur de technologie qui permet de faire bénéficier l'industrie aéronautique et spatiale de réseaux de communication fiables, dans les bandes Q-V (~ 40-50 GHz) et la gamme d'ondes millimétriques (~100 GHz) de futurs satellites de communication à très haut débit (comme le Megasat du CNES). Après trois ans de recherche, les progrès accomplis sur les RF-MEMS sont considérables. La fréquence d'émission a ainsi pu être augmentée de 10 fois comme corrélativement les flux d'informations transmis.

Pour l'aéronautique, ces systèmes radio miniatures permettent également la suppression des câbles électriques, qui habituellement relient au cockpit les capteurs fournissant l'état de santé des systèmes de vol le long de la structure de l'avion jusqu'au cockpit. Lourds et longs à installer, ceux-ci peuvent être remplacés par des antennes positionnées sur le capteur avec, à la clé, un allègement de l'avion, une réduction du temps de l'installation et de maintenance et la capacité de mettre en œuvre des Wi-Fi de cabine permettant d'alimenter les télévisions installées dans les sièges.

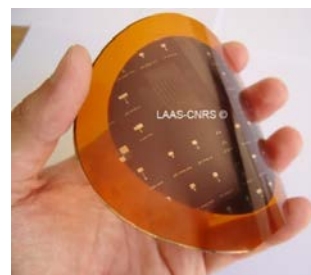
### 4- Moyens et collaborations mis en place

Le projet SYMIAE s'est appuyé sur le travail de 2 ETPT de permanents et a bénéficié du recrutement de 3 chercheurs post doctorants. Il a fait l'objet de 9 publications et de 9 présentations à des conférences internationales

### 5-Retombées internationales

L'ensemble des travaux a bénéficié de partenariats avec les Universités d'Athènes et de l'Ohio State University. SYMIAE a également bénéficié du développement d'un transceiver 100 GhZ (Université de Toronto / LAAS) qui constitue le « front end » du système complet, et des compétences développées (Université « Georgia Tech » / CIRIMAT) en matière d'impression « low cost » de circuits par jet d'encre et d'intégration hétérogène sur des substrats flexibles (fig.3)

Figure 3 : Exemple d'application du projet SYMIAE : antenne micro-ondes (~ 30-100 Ghz) directionnelle, constituée d'un réseau de microsystemes émetteurs/récepteurs, fixé sur un support flexible



### 6- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le niveau de TRL atteint à la fin du projet a été estimé au niveau **4 à 5**. Si certaines briques de base ont déjà fait l'objet de validation en environnement représentatif, le système complet est encore au stade de validation fonctionnelle. Les acteurs nécessaires au système sont aujourd'hui au niveau du prototype de démonstration (TRL5-6) et peuvent entrer dans des phases de pré industrialisation. Des plateformes technologiques de caractérisation et de réalisation permettant de tester la fiabilité des RF-MEMS ont également été développées et sont à la disposition des industriels.

Les secteurs d'activité concernés par les applications relèvent des télécommunications, des transports, de la santé, et de la problématique des « objets communicants » : Monitoring multi capteurs pour avions (Airbus,...), antennes planes adaptatives sur substrats flexibles (Airbus, Thales,...), Smart cockpit (Airbus, Thales), Satellites (TAS, Airbus DS). Quelques premières collaborations ont été établies dès la fin du projet avec TAS et IHP (design), avec la PME 31-Degré (process), avec la PME Fialab (caractérisation).

**Coordination : IRT**

**Laboratoires participant : IRT, ISAE, LAAS, ONERA**

**Début : 2011**

**Durée : 3 ans**

## 1. Contexte général

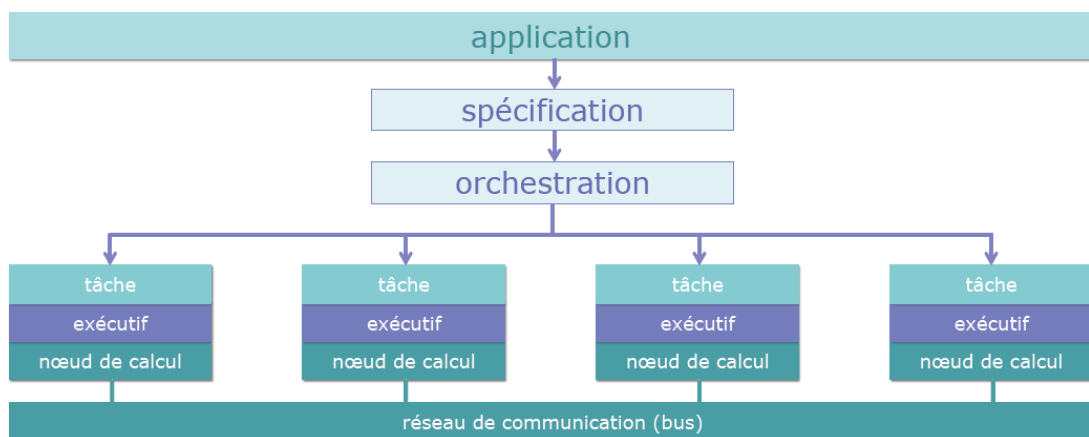
Le principal objectif de ce projet était d'alimenter les réflexions menées dans le cadre du chantier TORRENTS en proposant des pistes pour une orchestration possible de l'approche orientée par le temps sur une certaine architecture cible. Le but principal était d'étudier la faisabilité des concepts généraux, afin de raffiner et enrichir l'approche en fonction des difficultés de mise en œuvre identifiées au cours du projet. Les travaux concernent les trois axes suivants :

- a) Langages de spécification/programmation à sémantique dirigée par le temps.
- b) Plateformes : architecture des nœuds de calcul et couches exécutives (OS et middleware).
- c) Compilation / implantation de modèles dirigés par le temps. L'objectif était d'étudier la possibilité de générer, conjointement aux programmes, des mécanismes de vérification à l'exécution des propriétés temporelles qui doivent être respectées.

## 2. Aspects novateurs de l'approche

Tout comme le chantier TORRENTS auquel il est étroitement associé, le projet TOAST a eu un effet très structurant sur les recherches menées dans les quatre laboratoires toulousains (IRT, ISAE, LAAS et ONERA) autour des systèmes embarqués informatiques critiques.

Il a notamment permis de lancer des travaux communs autour des systèmes à criticité mixte, sujet tout à fait dans les préoccupations actuelles comme le montrent le grand nombre de conférences/ateliers/séminaires autour de ce thème.



## 3. Principaux résultats

**Sémantique et compilation de langages synchrones.**

- La définition d'un nouveau langage mieux adapté pour la traduction vers des cibles dont l'architecture est parallèle: il supporte intrinsèquement la définition d'horloges multiples.
- Le langage de description d'architecture AADL a été utilisé pour formaliser des éléments de l'architecture sous-jacente. Cette approche permet d'envisager une formalisation de bout en bout de la traduction à partir du langage synchrone de modélisation vers l'architecture cible dont les caractéristiques ont été décrites en AADL.

### ***Placement automatique d'une application temps-réel sur une architecture massivement parallèle***

Il a été développé un atelier de conception de bout-en-bout de systèmes temps-réel sur architectures massivement parallèles. Les évaluations qui ont été menées dans le cadre du projet montrent que le surcoût à l'exécution engendré par la mise en œuvre de l'approche est raisonnablement faible.

### ***Intégration d'applications à criticité mixte***

Pour des raisons de coût et d'encombrement il est souhaitable d'intégrer plusieurs applications ayant des niveaux de criticité différents sur une plateforme commune. Dans le cadre de ce projet, il a été proposé une approche sûre qui permet d'améliorer sensiblement l'utilisation des ressources partagées.

### ***Spécification et contrôle des exigences de sûreté***

Il a été proposé une approche générale pour la construction de spécifications de sûreté de haut niveau fondée sur l'analyse des risques. Des mesures de sûreté sont implantées dans un dispositif appelé moniteur de sûreté, simple et indépendant du canal de contrôle principal, et donc plus simple à vérifier/valider. Ce moniteur est le seul responsable de la sûreté du système.

## **4. Moyens et collaborations mises en place**

La principale collaboration mise en place est celle entre les quatre laboratoires du projet. On peut aussi noter l'intérêt manifesté par des industriels (Thales, Airbus Defence and Space) par le biais de contributions et/ou d'articles co-signés.

## **5- Retombées internationales**

Les collaborations internationales qui ont pu être établies ces dernières années autour de la thématique des systèmes orientés par le temps l'ont été principalement dans le cadre du chantier TORRENTS.

On retiendra que le recrutement d'un post-doc de nationalité chinoise a permis de consolider les relations de l'équipe ACADIE de l'IRIT avec l'Université de Pékin. Les collaborations avec la Chine incluent également l'université de Nanjing.

## **6- Degré de maturité technologique (TRL) et potentiel applicatif**

L'objectif du projet TOAST était avant tout d'identifier des verrous et d'explorer des voies possibles pour les résoudre. De ce fait, les différents résultats obtenus sont plus proches de la preuve/validation de concept que de la définition et de l'implantation d'outils transférables à court terme. Le niveau de **TRL** atteint est estimé à **2/3**, des modules prototypes ont été étudiés, mais l'intégration reste à faire.

Toutefois, il a été noté un fort intérêt d'industriels pour les recherches menées dans ce projet, intérêt qui s'est concrétisé par des expérimentations sur des applications réelles (avec Thales), par la soumission d'une proposition de projet ANR (avec Thales).

## **7- Suites au projet**

Les résultats du projet ont donné lieu au montage de deux nouveaux projets : un projet national autour de la thématique de la criticité mixte, et un projet européen portant sur les mécanismes qui permettraient de rendre prévisibles des architectures multi-cœurs du commerce.



## Systèmes complexes : Assimilation des données

➤ ADTAO



**Coordinateurs :** Serge Gratton (CERFACS/IRIT)

**Laboratoires participant :** CERFACS, IRIT, Météo-France/CNRM, OMP/GET

**Début projet :** juin 2009

**Durée :** 3 ans (puis prolongation à 4 ans)

### 1- Contexte général

L'assimilation de données permet de contrôler au mieux la reconstitution de l'état d'un système et/ou d'améliorer la détermination de son évolution. Les problèmes d'assimilation de données mettent en jeu des situations physiques complexes, comportant plusieurs millions de degrés de liberté. Par ailleurs les méthodes numériques actuelles supposent que la dynamique peut être représentée par un système déterministe.

Le projet ADTAO développe une extension de cette approche en introduisant une modélisation stochastique des incertitudes sur le système dynamique, avec prise en charge algorithmique dans des applications opérationnelles (météorologie, océanographie, géodésie).

### 2- Aspects novateurs de l'approche

Le principal défi du projet ADTAO était de, simultanément et de façon fortement interactive: (1) développer de nouvelles approches mathématiques, avec les preuves de convergence correspondantes, (2) mettre au point des algorithmes plus performants, adaptés aux nouvelles techniques du calcul intensif, et (3) réaliser de façon effective des applications à caractère finalisé, avec l'obtention de nouveaux résultats scientifiques et l'amélioration de codes opérationnels.

### 3- Principaux résultats

Parmi les résultats les plus importants du projet on peut citer

- dans le domaine algorithmique de l'optimisation pour l'assimilation de données: le développement et la mise au point de solveurs non-linéaires standards utilisant des approches multigrilles. Un nouveau préconditionnement ne nécessitant qu'un volume de mémoire limité a été introduit puis appliqué avec succès aux systèmes océaniques,

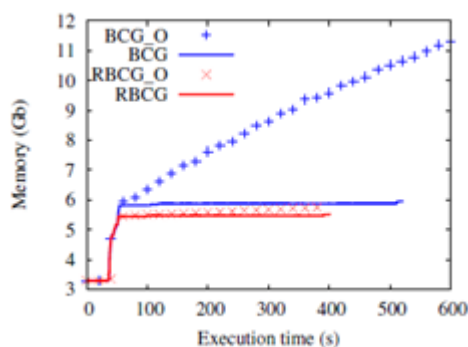


Figure 1 : Occupation mémoire en fonction du temps de calcul dans la minimisation de la méthode variationnelle à 3 dimensions, en utilisant deux types d'algorithmes, dual (RBCG) et primal (BCG), sans et avec (\_O) réorthogonalisation

- dans le domaine géodésique : la mise en place d'une nouvelle approche pour l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre (estimation des séries temporelles de cartes régionales de densité surfacique de masse par inversion des anomalies de différence de potentiel mesurées par le satellite GRACE),

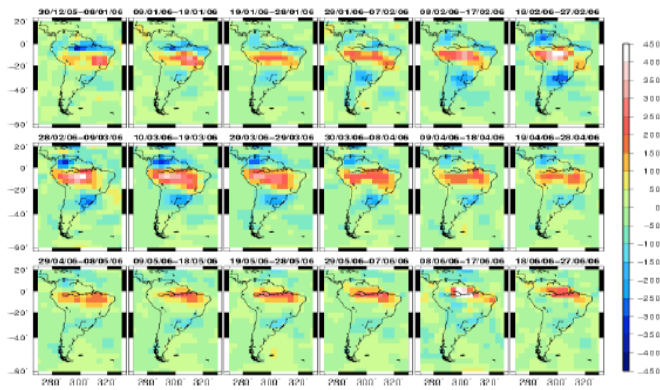


Figure 2 : Distribution spatiale de variations surfaciques de masse exprimée en hauteur d'eau équivalente (en mm) par inversion de mesures GRACE

- dans le domaine mathématique : le développement de nouvelles méthodes de modélisation de la matrice de covariance des erreurs d'observation dans les systèmes d'assimilation de données pour prendre en compte leurs corrélations spatiales et temporelles, avec réalisation d'applications océaniques et météorologiques.

L'ensemble des résultats du projet a fait l'objet de 16 publications dans des revues internationales.

#### 4- Moyens et collaborations mises en place

Le consortium formé à l'occasion de ce projet entre le CERFACS, l'IRIT, le CNRM (Météo-France) et le GET s'est révélé très stable (cf. point 7 *infra*). Il a permis de constituer et de faire connaître ce qu'il est désormais possible d'appeler l'"Ecole toulousaine en assimilation de données", autour de laquelle a commencé à s'agréger l'aéronautique (AIRBUS). Voir aussi le point 5 *infra* relatif aux collaborations internationales

#### 5- Retombées internationales

Trois nouvelles collaborations internationales ont pu être initiées, puis développées :

- Mark Buehner (Environnement Canada) sur l'assimilation de données ;
- Jan Mandel (Université du Colorado) sur les méthodes numériques. Ce dernier a par ailleurs donné un cours sur la thématique du projet dans le cadre du master entre ENSEEIHT/ENM ;
- Luis Vicente (Université de Coimbra) en optimisation sans dérivées, avec, entre autres, co-encadrement actuel 3 thèses toulousaines.

Des collaborations plus anciennes ont par ailleurs pu être renforcées et développées dans le domaine de l'assimilation de données, avec Iain Duff (RAL, UK) et Philippe Toint (Université de Namur).

#### 6- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Les méthodes développées dans le projet ont pu, pour certaines, être implantées dans des codes de production opérationnels:

- préconditionneurs mémoires limitées et solveurs duaux ;
- algorithmes d'optimisation sans dérivées dans la chaîne "Optalia" d'Airbus ;
- certains algorithmes évolutionnaires (variantes de la méthode CMA-ES) sont l'objet d'étude dans le cadre d'un partenariat CERFACS-TOTAL.

Le TRL atteint est de 3/4 pour les applications de nature R&D, mais est de niveau 7 pour les applications de type Airbus ou Météo France.

#### 7- Suites au projet

Le consortium s'est pérennisé à travers le chantier MOMA, qui a donné lieu à 2 nouveaux projets : FILAOS (démarré en 2012) et AVENUE (démarré début 2014). Deux contrats de thèses avec TOTAL et 1 thèse CIFRE avec EDF ont par ailleurs été mis en place. Enfin, J. Mandel (cf. point 5) est depuis lors enseignant dans un master commun ENSEEIHT-Météo-France.

## Système Terre et Espace

- ACCLIMAT
- CYMENT
- ITAAC
- MAELIA
- MAISOE
- POGÉQA



**Coordination :** CNRM et AUAT

**Laboratoires participant :** CNRM, AUAT, CERFACS, CIRED, GEODE, LRA, ONERA

**Début :** 2010

**Durée :** 3 ans

## 1. Contexte général

L'objectif est d'étudier les interactions entre les processus de développement urbain, le micro climat urbain et le changement climatique.

L'étude est réalisée à l'échelle du siècle, pour tenir compte d'une part de l'inertie des modifications structurelles de la ville, et d'autre part des scénarios climatiques issus du 4ème rapport du GIEC.

Pour répondre à la complexité du système ville, ce projet s'appuie essentiellement sur la modélisation numérique des processus et leurs interactions (développement urbain et micro-climat urbain, expansion et spatialisation, morphologie urbaine et consommation énergétique), ainsi que sur le développement de méthodes (descente d'échelle, combinaison de bases de données et couplage de codes numériques).

Cette étude a été réalisée dans le cas de l'agglomération toulousaine.

## 2. Aspects novateurs de l'approche

Le travail technique qui a été fait est assez novateur. Il n'était pas évident en effet de faire causer ensemble des spécialistes de domaines différents (météorologues, urbanistes, ...) et de parvenir à coupler (au sens informatique du terme) les modèles qui traduisent leurs connaissances. Ceci a été fait avec un succès très satisfaisant, et doit être mis au crédit du projet.

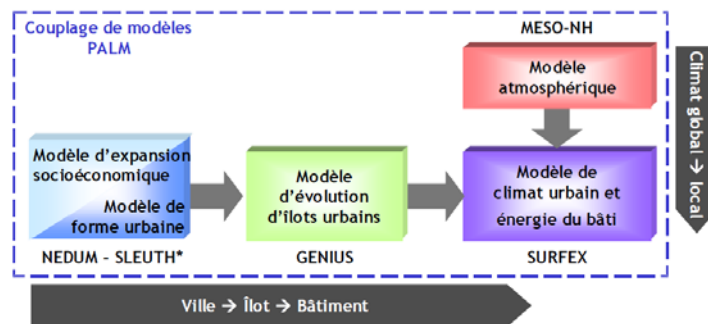


Fig. 1 : Le couplage des modèles de la plateforme ACCLIMAT

## 3. Principaux résultats

Le principal résultat est méthodologique, à savoir disposer d'une plateforme de modélisation numérique intégrant les différents aspects influant sur le développement urbain.

Concernant l'application à la ville de Toulouse, le projet a permis d'apporter de nouveaux éclairages sur les impacts sur le très long terme de divers leviers d'aménagement urbain, en lien avec le changement climatique.

La ville dense est présentée depuis quelques décennies comme le paradigme de la ville vertueuse d'un point de vue environnemental. Une méthode classique pour y parvenir est d'implanter une ceinture verte interdisant (ou limitant fortement) toute construction. Toutefois, paradoxalement, une ceinture verte peut avoir sur le long terme l'effet inverse de celui escompté au départ: en cas d'affluence forte de population dans l'agglomération, nombre de ménages s'installeront non pas à l'intérieur de la

ceinture verte, où la densité est forte, mais à l'extérieur, augmentant fortement les mouvements pendulaires journaliers vers le centre-ville, au point d'être plus importants que si la périurbanisation diffuse continuait comme maintenant. Londres ou Ottawa sont des exemples types de ce phénomène. En ce qui concerne le climat en ville, l'influence de la végétation est bénéfique puisqu'elle permet de contrecarrer l'effet d'îlot de chaleur urbain lié à l'accroissement de la population. Les consommations énergétiques sont principalement pilotées par les scénarios technologiques du bâti et les scénarios d'usages.

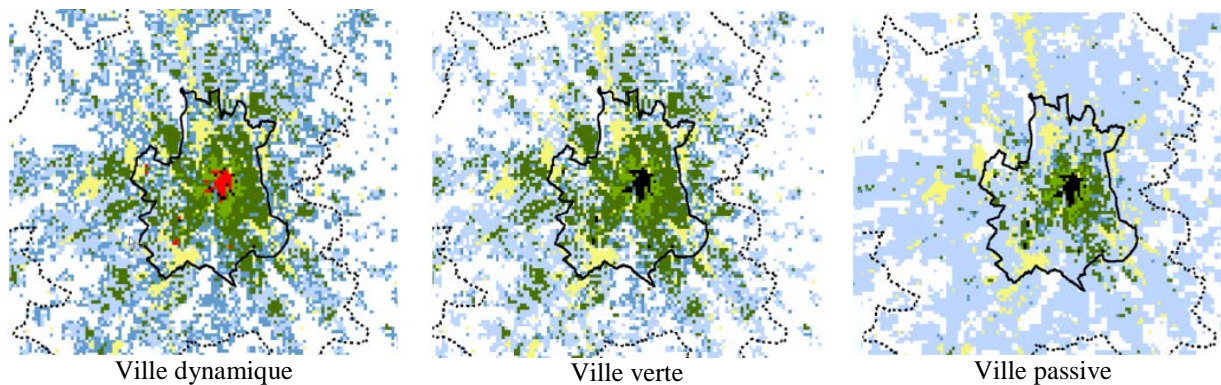


Fig. 2 : Toulouse en 2100 selon le modèle GENIUS: répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé) pour trois *scenarii* différents

#### 4. Moyens et collaborations mises en place

Le projet repose sur une collaboration tout à fait originale entre des équipes de simulation numérique du domaine atmosphérique (CNRM), des spécialistes du couplage de modèles (CERFACS) et des équipes d'urbanisme (AUAT), architecture (LRA) et géographes de l'environnement (GEODE).

Le projet s'est appuyé sur un nombre important de permanents (équivalent à 106 hommesxmois). Il a bénéficié du recrutement de 5 post-doctorants et de 4 ingénieurs

Six publications dans des revues internationales ont permis de présenter les principaux résultats du projet (à la date de la fin du projet).

#### 5. Degré de maturité technologique (TRL) et potentiel applicatif

Le projet a connu une montée en TRL importante, en effet parti d'un niveau 1 à 2 au stade de concepts, il a atteint **un niveau 5 à 6**, le modèle appliqué à des scénarios réels passés a donné des résultats satisfaisants

La plateforme qui a été développée dans ACCLIMAT a été transférée au Bureau d'études de Météo-France, afin que puissent être réalisées des études sur les villes (en particulier sur l'impact d'aménagements urbains) prenant en compte proprement les interactions entre les différents processus urbains et météorologiques. D'autre part, des modules spécifiques, comme SLEUTH, font l'objet d'une étude préalable en vue d'un dépôt de brevet.

#### 6. Suites au projet

Afin d'étendre la plateforme à d'autres villes, le développement d'une génération automatique des données urbaines utilisables par GENIUS et TEB sera menée au sein du projet MapUCE (financé par l'ANR). Les indicateurs développés dans ACCLIMAT pour rendre compte des leviers d'action urbain seront aussi pris en compte dans ce projet dont un des objectifs scientifique et sociétal est d'identifier les moyens juridiques et législatifs permettant de prendre en compte le plus efficacement possible les problématiques énergétiques et climatiques dans la planification urbaine.



**Coordinateurs :** Anny Cazenave (LEGOS) et Denis Dartus (IMFT)  
**Laboratoires participant :** CESBIO, CNRM, IMFT, LA, LEGOS, GET  
**Début projet :** avril 2008 **Durée :** 3 ans

## 1- Contexte général

Les ressources terrestres en eau, ainsi que leur répartition territoriale et temporelle, constituent un des principaux enjeux des années à venir. Le projet CYMENT s'est attaché à i) évaluer l'apport de données spatiales multi-capteurs à l'étude du cycle de l'eau et de ses variations en réponse au changement climatique et au forçage anthropique, ii) valider les produits hydrologiques 'spatiaux' par comparaison avec des mesures in situ et des sorties de modèles, et iii) développer un plateau de modélisation hydrologique et hydrodynamique à différentes échelles spatio-temporelles utilisant l'observation spatiale. Le projet comprend deux volets principaux: 'grande échelle' (cycle de l'eau et de la matière dans les grands bassins fluviaux) et 'petite échelle' (échanges surface-atmosphère et prévision des crues), plus un petit volet sur la détection des eaux souterraines en zone côtière.

## 2- Aspects novateurs de l'approche

Le premier challenge rencontré est l'utilisation simultanée de plusieurs capteurs spatiaux : i) altimétrie par radar, conjuguée à l'imagerie optique, ii) gravimétrie, par la mesure de la trajectoire des satellites, iii) imagerie radar à basse fréquence sensible à l'humidité des sols (cf. fig. 1 & 2). Le second est associé à la collaboration étroite au sein du même projet, entre spécialistes de la donnée spatiale, modélisateurs à petite et moyenne échelle pour développer une base de données hydrologiques mondiale. La conjonction entre ces spécialités permet de discriminer entre les masses d'eau libre, celles qui imbibent le sol et celles qui sont stockées dans les réservoirs profonds (nappes phréatiques, aquifères karstiques). Toutes les compétences nécessaires étaient déjà présentes au sein des six laboratoires du projet. Celui-ci a permis de les réunir pour construire un faisceau de nouvelles collaborations, mieux structurées autour de la question du cycle hydrologique. Aujourd'hui, au niveau international, seule la NASA a su construire un projet similaire

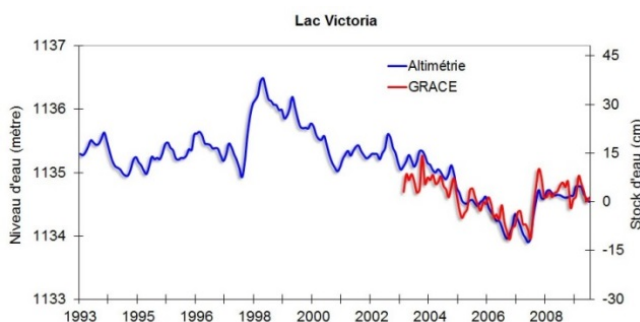


Fig 1 : Mesure du niveau du lac Victoria par altimétrie (en bleu), superposé à son estimation par gravimétrie (en rouge)

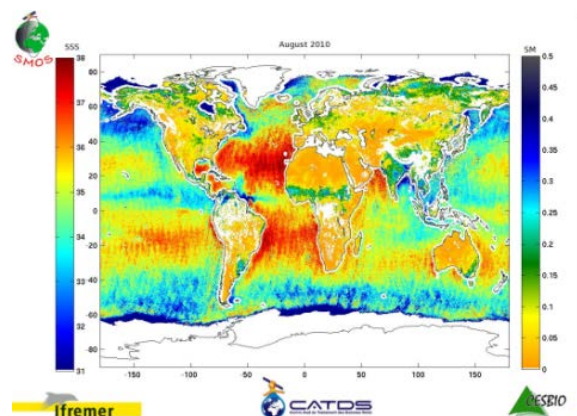
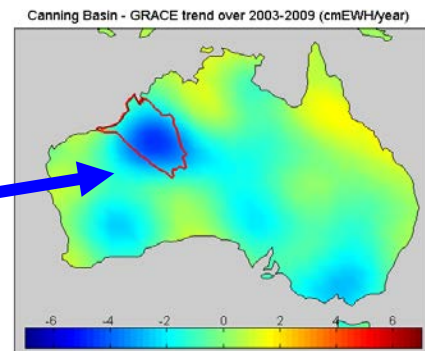


Fig.2 : Cartographie de l'humidité des sols et de la salinité marine par imagerie radar en bande L

### 3- Principaux résultats

Les résultats les plus importants obtenus concernent le volet « grande échelle ». La combinaison des produits satellitaires et les sorties des modèles numériques ont permis des analyses hydrologiques très précises et nouvelles sur différents bassins (Amazonie et Afrique de l'Est, en particulier), ainsi que la détermination des pertes occasionnées par l'irrigation excessive sur les ressources profondes (cf. fig. 3). D'autre part, l'assimilation des données satellitaires dans les modèles numériques a permis de multiples avancées, comme la représentation des zones inondées à grande échelle. D'autres résultats intéressants concernent l'effet des eaux continentales et du stock de neige sur le niveau de la mer. Les travaux à petite échelle concernent surtout la simulation d'événements précipitants type cévenol et constituent une suite à des travaux antérieurs.

Fig. 3 : Déficit en eau de l'aquifère « Canning » en Australie occidentale due à l'irrigation agricole excessive



### 4- Moyens et collaborations mises en place

Le projet CYMENT s'est appuyé sur le travail d'une vingtaine de chercheurs et d'autant d'ingénieurs permanents. Il a nécessité le recrutement de 7 post doctorants et 1 ingénieur et a fourni la substance d'une cinquantaine d'articles dans des revues à comité de lecture. Le recrutement de deux seniors pendant le projet a par ailleurs permis d'établir des collaborations durables avec l'université de Princeton (USA) et celle de Melbourne (Australie).

### 5- Retombées internationales

Le travail réalisé est en pointe au niveau européen, surtout pour ce qui concerne l'utilisation conjointe de l'altimétrie et la gravimétrie. Une retombée du projet concerne la préparation de la future mission SWOT dédiée à l'embarquement d'un radar altimétrique à large fauchée, permettant d'agrandir la surface explorée au sol.

### 6- Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le niveau de TRL atteint par le projet CYMENT a été estimé à **3**. Les principaux concepts et les modèles ont été validés de manière analytique et/ou expérimentale. Les applications peuvent donner lieu à des projets « opérationnels » ou de service, assez rapidement :

- développement d'un service générique d'évaluation et prévision des ressources en eau.
- utilisation par le SHAPI (prévision des crues) avec une régionalisation prévue à l'arc méditerranéen.

Certaines applications concernent potentiellement le marché mondial.

### 7- Suites au projet

Un nouveau projet est soutenu par la Fondation STAE, en réponse à l'appel à projets 2013 du RTRA, qui s'élargit aux questions de services dans le secteur aval, avec production d'indicateurs hydrologiques.

**Coordinateurs :** Daniel Cariolle (CERFACS)

**Laboratoires participant :** CERFACS, CNRM, IMFT et LAPLACE.

**Début :** 2009

**Durée :** 3 ans

## 1. Contexte général

L'objectif du projet est de caractériser l'impact du transport aérien sur la composition atmosphérique et de manière plus générale sur le climat. Ceci nécessite de connaître les rejets par les réacteurs, leur dispersion et les réactions chimiques et microphysiques dans le sillage de l'avion et enfin d'effectuer une modélisation à plus grande échelle des effets sur le bilan radiatif de l'atmosphère.

## 2. Aspects novateurs du projet

Le projet ITAAC est en grande partie une suite à un projet européen qui avait initié ce type d'étude. Le soutien du RTRA a permis d'approfondir les études. La principale innovation du projet est l'ambition de modéliser les différentes étapes des processus, depuis la combustion au niveau du réacteur jusqu'à l'échelle atmosphérique globale, en passant par les échelles du sillage. Le soutien du RTRA a aussi permis de garder l'avance acquise vis-à-vis du projet américain ACCRI.

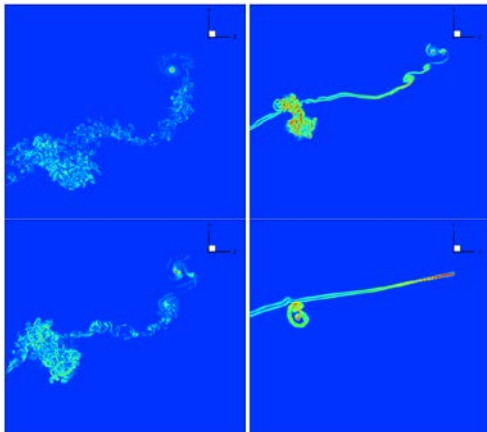


Fig. 1 : La valeur absolue de la vorticité dans des sections planes derrière l'avion. Les distances sont  $x/L = 0, 1$  (1er rang),  $2$  et  $3$  (2<sup>ème</sup> rang).  $L$  est une envergure.

## 3. Principaux résultats

Le principal résultat obtenu concernant le champ proche est la modélisation fine des productions de suie, ainsi que les données spectrométriques permettant l'étude radiative de ces suies.

Pour ce qui concerne la dispersion dans la traînée, un résultat remarquable est la réussite de la modélisation multi-échelles (codes NTMIX et Meso-NH). Un résultat inattendu est le rôle important du rayonnement dans l'évolution de la traînée de condensation (« contrail »). Enfin, la modélisation climatique a permis de montrer que l'impact du trafic aérien se faisait surtout sentir dans l'hémisphère Nord (augmentation de l'ozone et de la température de la troposphère), là où le trafic aérien est, et restera, le plus intense.

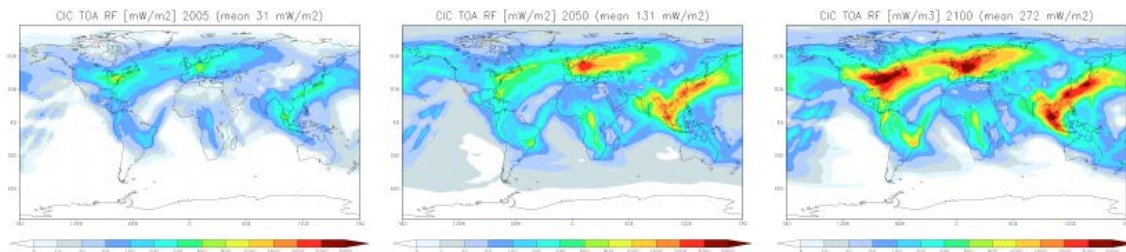


Fig. 2 : Cartes des anomalies de forçage radiatif au sommet de l'atmosphère (en mW/m<sup>2</sup>) dues à l'aviation simulées pour les années 2005 (à gauche), 2050 (au milieu) et 2099 (à droite)

#### 4. Moyens et collaborations mises en place

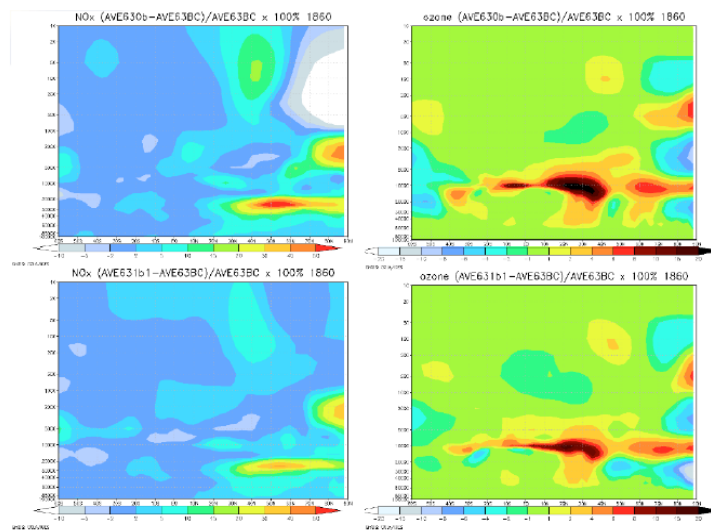
Le projet ITAAC s'est appuyé sur le travail d'une dizaine de chercheurs permanents. Il a bénéficié du recrutement de 10 post-doctorants. Le travail effectué a permis d'aboutir à une dizaine de publication dans des revues internationales (à la date de septembre 2013).

Les collaborations entre le CNRM et le CERFACS (qui ont une forte expérience de travail en commun), avec l'IMFT pour les problèmes de turbulence à petite échelle et avec des équipes du LAPLACE pour les calculs de transfert radiatif constituent une approche pluridisciplinaire nouvelle et efficace.

#### 5. Retombées internationales

Une collaboration a été établie avec le DLR (Allemagne) ainsi qu'avec le consortium d'établissements américains réunis au sein du projet ACCRI

Fig. 3 : Coupes latitude/pression de l'anomalie (%) d'oxydes d'azote NO<sub>x</sub> (à gauche) et d'ozone (à droite) générées par l'aviation dans le cas d'émissions brutes (en haut) et dans le cas où la paramétrisation est appliquée (en bas)



#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le niveau de TRL atteint est de **2 à 3**. En effet, l'ensemble des concepts a été formulé et des vérifications expérimentales ont été réalisées.

Ce projet n'aboutit pas directement à des applications industrielles ou de services. Il se place dans l'avancée des connaissances. Par contre, il peut avoir un impact sur l'industrie aéronautique qui devrait diminuer non seulement les émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi celles des suies à l'origine de la formation de traînées de condensation. Enfin, cette étude peut avoir aussi un impact sur la gestion du trafic aérien, en vue d'éviter les zones saturées en vapeur d'eau.

#### 7. Suites au projet

La thématique « impact climatique du transport aérien » a été reprise dans les travaux du CORAC et 3 projets ont été proposés qui seront financés par la DGAC, sur 4 ans.

**Coordinateur :** Pierre Mazzega (GET/OMP)

**Laboratoires participant :** GET, IRIT, AGIR, UTM/MSHS, ECOLAB

**Début :** 2009

**Durée :** 5 ans

## 1. Contexte général

Il s'agit de développer une plateforme de simulation numérique des impacts socio-écologiques des normes environnementales. Cet objectif a été circonscrit à un domaine pertinent pour nombre de territoires - à savoir la modélisation de la gestion de la ressource en eau dans un bassin hydrographique (ici le bassin Adour-Garonne). Une égale importance est donnée à la représentation des « dynamiques » biophysiques de la ressource, à ses usages (usages agricoles, industriels et domestiques), et aux jeux d'acteurs – individuels, collectifs ou institutionnels – impliqués tant dans les usages que dans les diverses dimensions de cette gestion (financement, allocation, suivi, police, sanction, etc.).

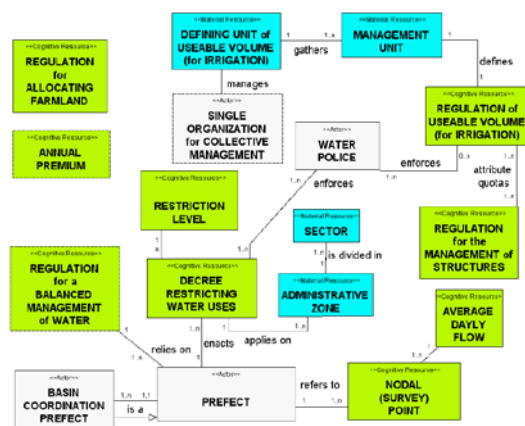


Fig. 1 - Sous-système normatif du système français de gestion d'étiage (schéma dérivé conformément aux exigences du méta-modèle). Les entités sont réparties en trois types: les acteurs (boîtes blanches), les ressources matérielles (boîtes bleues) et ressources cognitives (boîtes vertes).

## 2. Aspects novateurs du projet

La principale innovation de ce projet est la modélisation multi-agents, et ce que ceci implique au niveau pluridisciplinaire (sciences dures, sciences de l'homme,...).

La deuxième innovation est la réalisation même de la plateforme qui pourra postérieurement être adaptée en outils opérationnels.

## 3. Principaux résultats

Le principal acquis est clairement la construction de la plateforme de simulation. Les principaux processus modélisés sont : interactions eau/sol/plante ; hydrologie des différentes ressources en eau (cours d'eau, nappes, retenues, barrages) ; conduite des systèmes de culture, gestion des ressources en eau, changements d'occupation des sols (agricole et non agricole) ; évolution de la démographie à l'horizon 2030. La plateforme utilise un système d'intégration multi-échelles. Un grand nombre de jeux de données est utilisé pour représenter les sols, le climat, les ressources en eau, les systèmes agricoles, les unités de gestion, les infrastructures hydrauliques...

La deuxième avancée concerne la calibration du modèle. En effet, la calibration d'un tel ensemble de processus spatialisés en interaction nécessite le développement de méthodes basées sur la calibration séquentielle de sous ensembles de processus sur des critères dédiés.

#### 4. Moyens et collaborations mises en place

Les principales collaborations ont été établies à l'intérieur du projet : le GET (hydrologie), l'IRIT (méthodes numériques), AGIR (agronomie, gestion de l'eau) et UTM (usages, sociologie,...). Or du site toulousain, des collaborations ont été établies avec Espace-Dev (Montpellier) ; UA Barcelone...

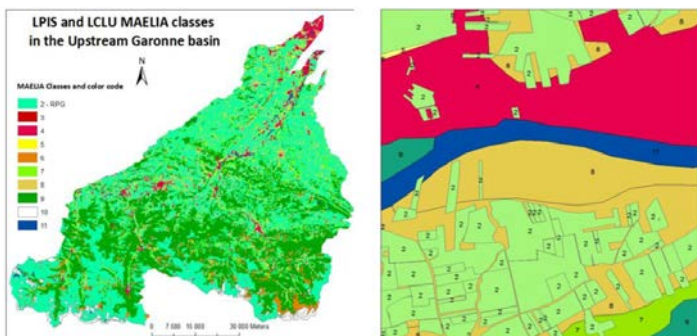


Fig. 2 - Emboîtement multi-échelle des entités territoriales. Gauche: à basse et moyenne résolution: hydrologie + occupation et usage des sols; Droite: à haute résolution: positionnement des ressources en eau et des parcelles agricoles (classe n°2 d'usage des sols, le positionnement spatial provenant du Registre Parcellaire Graphique 2010; cet exemple est produit sur une petite surface).

#### 5. Retombées internationales

Une collaboration avec le Brésil, dans le cadre du LMI OCE (Université de Brasilia). Des discussions en cours pour des applications en Tunisie, au Bangalore et aux USA.

#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le potentiel applicatif est important. Trois projets de transfert de la plateforme sont en cours :

- transfert porté par la CACG (compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne) ;
- transfert porté par ARVALIS, impliquant plusieurs laboratoires, pour l'approche territoriale de la gestion quantitative de l'eau.
- Projet de transfert financé par l'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques) concernant le développement d'un cahier de charges d'un outil de gestion opérationnelle de l'eau pour les services de l'Etat.

Après examen des résultats et compte tenu que le projet a débouché sur un outil opérationnel pour la gestion de l'eau, le TRL atteint est estimé à un niveau de **5/6**

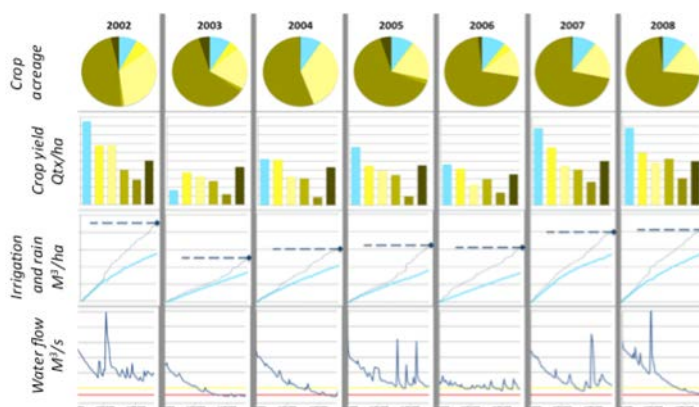


Fig. 3 - Synopsis de résultats-clés d'une simulation MAELIA sur la période 2002-2008, avec de haut en bas: superficie des cultures à l'échelle du bassin ; rendements des principales cultures irriguées (bleu = maïs) et des cultures pluviales (jaune au vert: blé, tournesol, pois, colza...); volume par hectare de l'eau d'irrigation cumulée moyenne et de l'eau de pluie dans les champs de cultures irriguées ; débit d'eau à la sortie du bassin de la rivière (les lignes jaunes et rouges représentent les niveaux du débit d'objectif d'étiage et du débit de crise respectivement).

#### 7. Suites au projet

Au-delà des projets de transfert, le projet MAELIA débouche sur des projets scientifiques en cours ou en développement. Le projet REGARD, soutenu par le RTRA, s'appuie en partie sur les résultats de MAELIA.

**Coordinateur :** Philippe Behra (LCA)

**Laboratoires participant :** CIRIMAT, LCA, LCC & LPCNO, LGC, LEGOS, GET, LAAS,

**Début :** 2009

**Durée :** 4 ans

## 1. Contexte général

Ce projet avait pour principaux objectifs de développer et valider des microcapteurs chimiques *in situ* pour l'analyse en continu des concentrations de composés ayant un impact sur le changement global et de la spéciation dynamique d'éléments présents à l'état de traces. Il comporte trois axes de recherche :

- i. l'analyse des nutriments impliqués dans la croissance du phytoplancton (milieu océanique), et plus particulièrement l'analyse de la silice dissoute;
- ii. l'analyse du méthane dissous en phase aqueuse (gaz à effet de serre): estimation des flux issus des sources sous-marines difficilement quantifiées et implication dans le cycle global du méthane (milieu océanique et/ou fluides hydrothermaux) ;
- iii. les éléments toxiques à l'état de traces, cas du mercure (surfaces continentales et océaniques) ;
- iv. la miniaturisation, le conditionnement à la phase liquide et une protection anti-corrosion et anti-salissure pour s'assurer de mesures fiables sur des temps longs, dans des endroits difficiles d'accès.

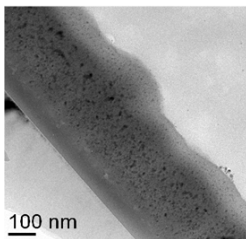


Fig. 1 : Micrographie en transmission électronique d'une section transverse du revêtement nano-architecturé montrant la dispersion de Ag NPs dans une matrice d'alumine amorphe.

## 2. Aspects novateurs du projet

Ce projet a permis d'associer des laboratoires « utilisateurs » et des équipes développant de nouveaux capteurs en s'appuyant sur des technologies nouvelles. Les aspects innovants résultent des nécessités de détecter des concentrations traces.

## 3. Principaux résultats

**Axe nutriments :** Plusieurs méthodes de détection électrochimique (indirecte) de la silice dissoute ont été développées et testées : le capteur ANESIS issu de la collaboration LGC-LAAS-LEGOS a donné les résultats les plus prometteurs, à partir d'une base silicium. Une nouvelle méthodologie de détection électrochimique des nitrates a été réalisée pour une gamme de concentration 10  $\mu\text{mol/L}$  à 10  $\text{mmol/L}$ .

Figure 2 : Photo du prototype n°2 ANESIS avec le boîtier électronique de la pompe, le réservoir d'entrée, la pompe, la cuve Mo, la cuve de détection du LEGOS et le réservoir de sortie.



**Axe méthane :** Un nouveau capteur pour détecter le méthane dissous a été mis au point en utilisant un film sensible, dont les propriétés optiques dépendent de la détection du méthane.

**Axe mercure :** Un prototype a été réalisé pour tester la séparation des colloïdes par fractionnement microfluidique. Par une méthode électrochimique à l'aide de nanoparticules d'or électrodéposées sur un support en carbone vitreux, les limites de détection obtenues au laboratoire sont de l'ordre de 10 pM.

**Axe transverse matériaux de protection :** Elaboration d'un revêtement composite nano-architecturé consistant en une dispersion de nanoparticules d'argent dans une matrice d'alumine amorphe. Des

tests en milieu naturel ont montré un ralentissement du développement de biofilm sur des échantillons immergés dans des eaux continentales.

#### 4. Moyens et collaborations mis en place

**Axe nutriments** : collaboration entre d'une part le LAAS, le LGC et le LCC (qui ont développé le capteur) et le LEGOS (utilisateur).

**Axe méthane** : Collaboration entre le LAAS (qui a développé le capteur optique) et le GET, utilisateur du capteur.

**Axe mercure** : Collaboration entre le LAAS (partie microfluidique), le LCA, le LCC-LPCNO et le LGC (développement et utilisateur du capteur).

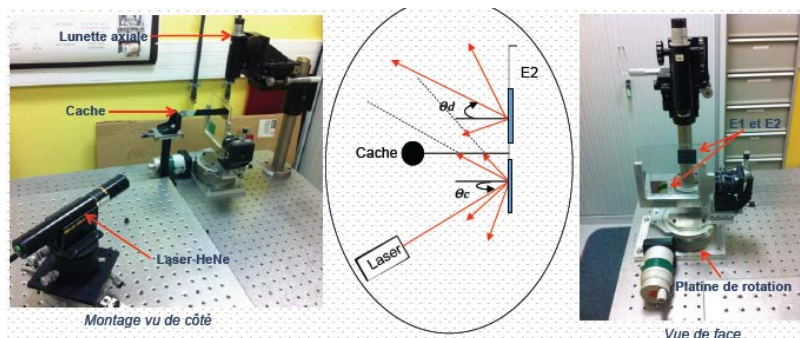


Fig. 3 - Dispositif expérimental mis en œuvre au LAAS pour la mise en œuvre du capteur méthane (E1 et E2 sur la photo)

#### 5. Retombées internationales

**Axe nutriments** : collaboration avec Ken Johnson (*Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA*)

**Axe méthane** : collaboration avec Ralph Prien du Laboratoire Océanographique de la Mer Baltique IOW (Allemagne).

**Axe mercure** : collaborations avec l'EAWAG et l'ETH Zurich.

**Axe transverse matériaux** : collaborations avec la *School of Engineering Bronx University* et le *Center for Research Innovation* de Mexico.

#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

Le projet comprend trois axes de recherche assez différents, ce qui justifie des estimations de niveau de TRL pour chacun d'eux :

- *nutriments* impliqués dans la croissance du phytoplancton, **niveau TRL atteint 4** ; des prototypes ont été testés en laboratoire, mais pas en milieu naturel ;
- *éléments toxiques*, cas du mercure comme traceurs des impacts anthropiques et de l'activité du phytoplancton, **niveau TRL atteint 2/3** ; le concept est validé (détection en milieu marin) mais problèmes de faisabilité technologique en l'état actuel ;
- *méthane* : estimation des flux issus des sources sous-marines difficilement quantifiées et implication dans le cycle global du méthane, **niveau TRL atteint 3** ; les concepts ont été prouvés de manière expérimentale ;
- *axe transverse matériaux* : degré de maturité bas (2) pour transfert vers l'industrie.

#### 7. Suites au projet

**Axe nutriments** : les travaux sur la silice dissoute continuent dans le cadre de deux nouveaux projets européens, au cours desquels des tests *in situ* seront réalisés. Poursuite des travaux sur la détection électrochimique des nitrates dans le cadre du projet MIACTIS, soutenu par le RTRA (2014-2017) ;

**Axe méthane** : Projet ANR accepté pour la suite du projet ;

**Axe mercure** : Projet DGA pour la partie microfluidique ; projet ANR déposé ;

**Axe transverse matériaux** : un projet ANR a été soumis sur la même thématique.



**Coordinateur :** Jean-Luc Attié (LA/OMP)

**Laboratoires participant :** LA/OMP, CNRM et CERFACS

**Début du projet :** 2009

**Durée :** 4 ans

## 1. Contexte général

Un enjeu fondamental de nos sociétés réside aujourd'hui dans notre capacité à mesurer et prévoir la qualité de l'air que nous respirons. La pollution chimique par des gaz tel que l'ozone ( $O_3$ ), les oxydes d'azote ou le monoxyde de carbone (CO), qui s'accumulent dans les basses couches atmosphériques du fait notamment des activités humaines, jouent un rôle central dans la préservation d'une bonne santé publique.

Les modèles numériques de prévision de la qualité de l'air (QA) s'appuient sur des mesures issues des réseaux locaux et de plus en plus sur des mesures spatiales. Les données spatiales proviennent actuellement de satellites défilants. Or, une des caractéristiques de la pollution atmosphériques près de la surface est sa variation diurne qui ne peut pas être déterminée par les satellites défilants, à cause de l'intervalle de temps entre deux passages sur un même point (jusqu'à plusieurs jours).

D'où l'idée d'explorer les possibilités d'un satellite géostationnaire pour accéder à la composition atmosphérique de la basse troposphère, qui conditionne la qualité de l'air.

## 2. Aspects novateurs de l'approche

Le projet a pour but d'étudier la valeur ajoutée provenant d'observations d'ozone et de monoxyde de carbone mesurées depuis une orbite géostationnaire pour la surveillance de la qualité de l'air en Europe. Le challenge de ce projet est de simuler les données obtenues par des capteurs géostationnaires en recherchant la configuration optimale instrumentale et d'évaluer leur apport dans les systèmes de prévision numérique. Cette évaluation se fait à partir d'expériences de systèmes d'observations simulées et met en oeuvre les modèles de QA et le meilleur de la technologie spatiale actuelle.

## 3. Principaux résultats

Le principal résultat acquis est le développement d'un simulateur numérique de données satellitaires géostationnaires. Ce simulateur a permis d'une part de démontrer l'intérêt d'un satellite géostationnaire pour la prévision de la qualité de l'air et d'autre part de définir les caractéristiques d'un

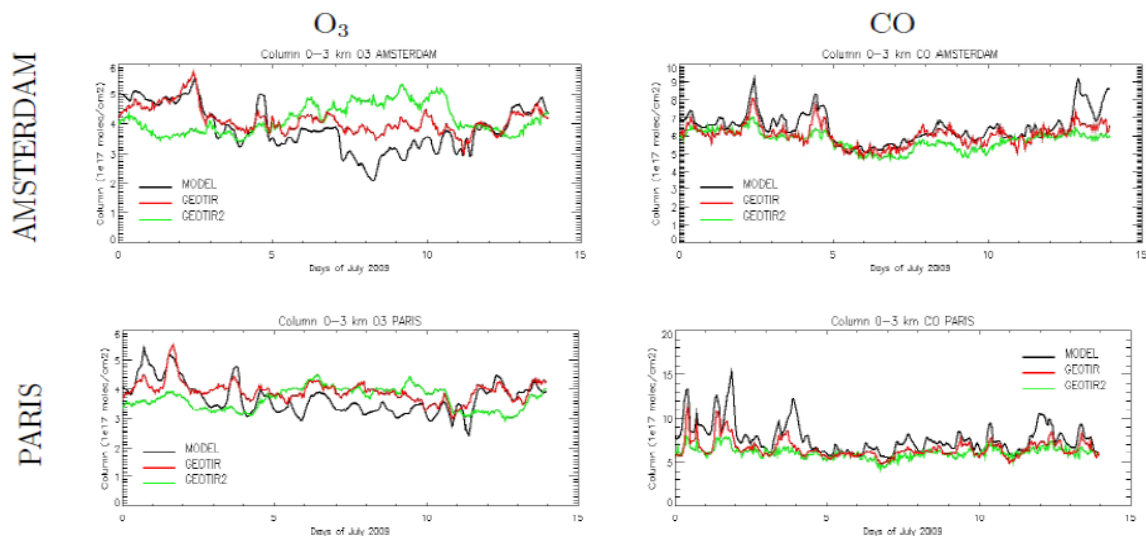


Fig. 1 : Séries temporelles concernant l'ozone (à gauche) et le monoxyde de carbone (à droite) pour les colonnes (molécules/cm<sup>2</sup>) comprises entre 0 et 3 km avec une résolution temporelle d'1 heure du 1er Juillet 2009 au 15 Juillet 2009. La ligne noire représente le modèle MOCAGE, la rouge MAGEAQ et la verte MTG/IRS. Exemple sur deux grandes villes européennes: Amsterdam et Paris

instrument à embarquer. Ceci a permis de faire une offre de mission pour Earth Explorer 8 à l'ESA. Ce projet MAGEAQ, a été bien évalué, mais finalement non retenu.

Les essais d'assimilation de données ont montré que l'utilisation de données issues d'un capteur géostationnaire permettrait de reproduire avec plus de précision la variabilité diurne de l'ozone et du monoxyde de carbone dans les couches les plus basses de l'atmosphère. L'intérêt de la revisite temporelle horaire dû à la plateforme géostationnaire est démontrée. Pour avoir la même couverture et les mêmes résultats il faudrait entre 6 et 12 satellites défilants

#### 4. Moyens et collaborations mises en place

Ce travail a été réalisé par 5 chercheurs permanents. Il a nécessité le recrutement de 3 post-doctorants. Il a donné lieu à 9 publications dans des revues internationales, à la fin du projet.

La participation de seniors étrangers a permis d'ouvrir de collaborations importantes avec le NILU, Norvège (assimilation de données) et avec l'université de Maryland (USA).

Un industriel, Astrium, a été associé au projet et a contribué avec un soutien à deux bourses doctorales et un soutien d'ingénieur sur la technologie satellite tout au long du projet.

#### 5. Retombées internationales

Un des plus grand succès de POGEQA c'est son impact international. Deux équipes internationales, une de la NASA et une autre de Corée du Sud ont décidé le lancement d'un géostationnaire pour la qualité de l'air. Elles ont profité des avancées développées dans le cadre de POGEQA pour leurs offres instrumentales. D'autre part le DLR allemand a commencé une phase 0 sur un instrument directement sorti des études de POGEQA et proche de MAGEAQ. Enfin, l'équipe de POGEQA s'est intégrée à un consortium international ayant pour objectif de se doter d'une flotte de géostationnaires permettant de couvrir l'ensemble de régions de l'hémisphère Nord.

Il faut aussi mentionner les contacts établis avec la Chine qui a montré son intérêt pour ce type de mission pour la qualité de l'air, sujet très sensible en Chine.

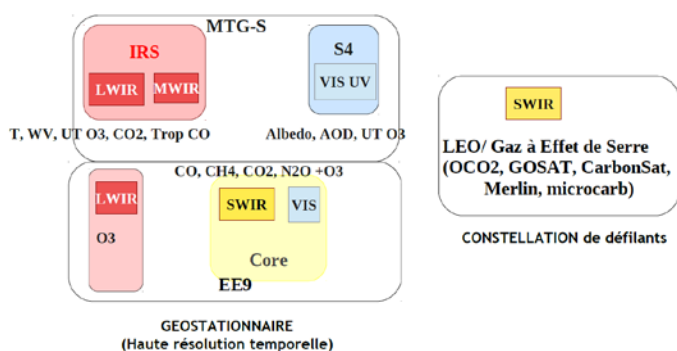


Fig. 2 : Schéma de la mission GEO qui sera proposée pour EE9 en complément de IRS et S4 et des satellites défilants futurs.

#### 6. Degré de maturité technologique (TRL) atteint et potentiel applicatif

La principale application industrielle de POGEQA est la construction des instruments à embarquer dans un satellite géostationnaire. Les retombées sont importantes au niveau de la conception d'instruments spatiaux pour l'industrie.

Le niveau de TRL atteint est de **3 à 4**. En effet, une équipe composée de laboratoires et d'industriels a été mise en place, les modélisations ont été réalisées, et le simulateur de données satellites a été réalisé.

#### 7. Suites au projet

Les deux suites principales au projet sont :

- Le soutien d'un nouveau projet en réponse à l'appel d'offres 2013 du RTRA ;
- le maintien et l'amélioration du consortium international mis en place pendant POGEQA pour la présentation d'une nouvelle mission à l'ESA dans le cadre d'Earth Explorer 9.

