



**Version**  
25/06/2014

**Diffusion**

FRAE

**Auteur**

SUPAERO Junior  
Conseil

Affilié à :



Nos partenaires :



# Étude d'analyse et de Synthèse de 24 projets de recherche



Fondation  
de Recherche  
pour l'Aéronautique  
& l'Espace



Toulouse, le 16 avril 2012

Madame, Monsieur,

Conformément à la Convention référencée 0214FRA\_CO spécifiant la réalisation par SUPAERO Junior Conseil, pour le compte de la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FRAE), d'une étude d'analyse et de synthèse de treize projets de recherche, veuillez trouver, rassemblés dans ce document, les fiches de synthèse concernant les vingt-quatre projets terminés financés par la Fondation.

Ces fiches de synthèses forment un recueil de 66 pages et concernent les projets :

- |                                  |                          |
|----------------------------------|--------------------------|
| 1. IPPON (appel n°8)             | 13. EPOPE (appel n°5)    |
| 2. ASTHER (appel n°7)            | 14. AMFORTAS (appel n°4) |
| 3. COMIFO (appel n°7)            | 15. CASSIS (appel n°4)   |
| 4. MATRAS (appel n°7)            | 16. CORTEC (appel n°4)   |
| 5. SONOTHERMOGRAPHIE (appel n°7) | 17. CURACO (appel n°4)   |
| 6. SYRTIPE (appel n°7)           | 18. MASAE (appel n°4)    |
| 7. ASCERT (appel n°6)            | 19. MOSAIQUE (appel n°4) |
| 8. CAVALE (appel n°6)            | 20. OPTIMIST (appel n°4) |
| 9. QUARTEFT (appel n°6)          | 21. PROMITI (appel n°4)  |
| 10. SARDANES (appel n°6)         | 22. RUPSCEN (appel n°4)  |
| 11. CASAREL (appel n°5)          | 23. THERMONC (appel n°4) |
| 12. EPAHT (appel n°5)            | 24. SURVOL (appel n°3)   |

Nous vous remercions pour la confiance que vous nous avez accordée et espérons que ce travail vous donnera entière satisfaction.

Veuillez agréer, Madame, Monsieur, l'expression de nos plus respectueux sentiments.

Pour SUPAERO Junior Conseil  
Le Chargé de Mission, M. Jonathan SCHMUTZ

## Fiche Projet : IPPON

**Appel à projet : N°8 - Mathématiques-** 29 juin 2009

**Acronyme du projet : IPPON**

**Titre du projet : Identification pour les Problèmes de Propagation d'ONdes**

**Nom et prénom du porteur de projet : RAMDANI Karim** – INRIA Nancy Grand-Est (Equipe projet CORIDA)

**Expert suiveur : Mohamed JAOUA-** Professeur des universités, Université Française du Caire

**Coût total du projet : 846 272 €**

**Montant du financement FRAE : 169 872 €**

**Durée : 24 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA Toulouse), Départements DERM et DTIM
- INRIA Nancy Grand-Est (Equipe projet CORIDA)

### Résumé du projet :

La détection de cibles à partir de mesures lacunaires est un problème très fréquent en aéronautique. De nombreuses techniques ont été récemment développées pour résoudre ce problème dans le cadre de la propagation acoustique ou électromagnétique (retournement temporel, méthode de factorisation).

Dans ce projet, nous souhaitons aller plus loin en abordant le problème nettement plus délicat de l'identification. Ce problème apparaît par exemple lorsque l'on souhaite obtenir les caractéristiques équivalentes ou détecter des défauts (usure, endommagement, ...) dans les matériaux composites fréquemment utilisés en aéronautique.

Le projet IPPON se propose de développer deux approches complémentaires pour résoudre ce problème :

- La première consiste à exploiter l'étape de détection pour améliorer la résolution du problème inverse par régularisation,
- La seconde approche repose sur des techniques récentes et originales issues de la théorie du contrôle et de l'automatique.

Dans les deux cas, de nouveaux algorithmes de reconstruction seront développés et leur robustesse sera testée.

L'un des objectifs du projet est de développer de nouvelles méthodes susceptibles de générer de nouveaux outils d'analyse et de simulation pour la détection et l'identification des problèmes de propagation d'ondes. Ces outils pourront conduire au développement de codes industriels répondant aux besoins dans les domaines de l'expertise et de la qualification d'équipements, tout particulièrement dans le domaine de la compatibilité électromagnétique.

Un site internet de présentation du projet IPPON sera conçu et certains codes développés y seront disponibles en ligne.

## Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

### ■ Publications dans des conférences et des workshops

[1] B. Guzina, M. Bonnet, 2012 « *Mini-Symposium Inverse problems* », **ECCOMAS 2012 (Vienne)**.

[2] 2011, “Control of partial differential equations”, **Conference of the European Research Group Project**.

[3] **ICNAAM**, 2011.

[4] K. Ramdani, B. Thierry, 2011, “*Numerical Investigation of Acoustic Time-Reversal in Heterogeneous Media*”, **WAVES’2011**.

[5] C. Burkard, K. Ramdani., 2011, “*Selective Focusing on Small Dielectric Inhomogeneities Using Time-Reversal*”, **WAVES’2011**.

[6] G. Haine, K. Ramdani, 2011, “*Reconstructing Initial Data Using Iterative Observers for Wave Type Systems. A Numerical Analysis*”, **WAVES’2011**.

[7] Y. Grisel, **ICIAM**, 2011.

[8] C. Burkard, K. Ramdani, B. Thierry, 2011 “*Polaritons, Surface plasmons, Resonances: Sub-wavelength interaction in optics*”, **Polariton**.

[9] 2010, “*Inverse Problems: Theory and Applications*”, **MSRI**.

[10] “*Dynamical Systems, Differential Equations and Applications*”, **The 8th AIMS Conference**, 2010.

[11] K. Ramdani, M. Tucsnak, G. Weiss, “*Observers for DPS back and forth in time.*”, 2010, **19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS 2010)**.

[12] C. Burkard, 2011, “*Nonlinear Least Squares in Shape Identification Problems*” (Oberwolfach, Janvier 2011).

[13] Y. Grisel, B. Thierry, K. Ramdani, 2010, Inverse Problems for Waves : Methods and Applications” (**École Polytechnique**, 29–30 mars 2010).

[14] X. Antoine, “*Frontiers in Applied and Computational Mathematics*”, Newark.

[15] Z. Belhachmi, 2010, “*Inverse Problems: Theory and Applications*”, Berkeley (University of California, Novembre 2010).

### ■ Publications dans des journaux

[12] S. Avdonin, V. Mikhaylov, K. Ramdani, 2012, “*Reconstructing the potential for the 1D Schrödinger equation from boundary measurements*”, (Submitted).

[13] Z. Belhachmi, H. Meftahi., 2012, “*Shape sensitivity analysis for an interface problem via*

*minimax differentiability*", (Submitted).

[14] C. Burkard, K. Ramdani., 2012, "Far field model for time reversal and application to selective focusing on small dielectric inhomogeneities", (Submitted).

[15] Y. Boubendir, X. Antoine, C. Geuzaine. , 2012," Quasi-Optimal Non-Overlapping Domain Decomposition Algorithm for the Helmholtz Equation", **J. Comput. Phys.**, 231 (2), (2012), 262-280.

[16] X. Antoine, K. Ramdani, B. Thierry., 2012," Wide Frequency Band Numerical Approaches for Multiple Scattering Problems by Disks", **J. Algorithms Comput. Technol.**, 6 (2), (2012), 241-259.

[16] G. Haine, K. Ramdani., 2012," Reconstructing initial data using observers : error analysis of the semi-discrete and fully discrete approximations", **Numer. Math.**, 120 (2), (2012), 307-343.

[17] G. Haine, K. Ramdani., 2011," Observateurs itératifs en horizon fini. Application à la reconstruction de données initiales pour des EDP d'évolution", **Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)**, 45, (2011), 715-724.

[18] K. Ito, K. Ramdani, M. Tucsnak., 2011," A time reversal based algorithm for solving initial data inverse problems.", **Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S**, 4 (3), (2011), 641-652.

[19] K. Ramdani, M. Tucsnak, G. Weiss. , 2010," Recovering the initial state of an infinite-dimensional system using observers", **Automatica**, 46 (10), (2010), 1616-1625.

**Liste des brevets déposés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final IPPON*

Le rapport final d'activité met en évidence un volume considérable d'activité assorti de résultats d'une qualité remarquable. Sur les sept tâches identifiées, une seule – la tâche III.a.1 relative à l'identification de fissures – n'a pu être abordée faute de temps. Les six autres ont été pour l'essentiel conduites à leur terme, donnant lieu à de multiples réalisations : huit articles soumis ou publiés en 2011 et 2012 ; trois thèses soutenues, la dernière étant prévue en octobre 2012 ; plusieurs communications à des conférences et congrès.

La première tâche, relative à la détection d'obstacles pénétrables ou non pénétrables, donne lieu à une étude très fouillée, tant au plan mathématique que numérique, de la méthode DORT, basée sur les propriétés de focalisation sélective des fonctions propres de l'opérateur de retournement temporel. C'est probablement la partie la plus innovante et la plus originale de ce document, qui n'en manque pourtant pas.

Le second chapitre traite de la localisation et de la caractérisation de défauts. La méthode de factorisation de Kirsch y est adaptée pour pouvoir s'appliquer à un milieu non homogène, et les résultats numériques sont convaincants. L'identification de l'indice du défaut donne lieu au développement de deux méthodes, la première de facture classique – type moindres carrés, et la seconde plus originale ayant de nouveau recours à la factorisation de Kirsch.

Le chapitre 3 est dédié à un travail d'essence plus théorique sur l'identification du potentiel dans un problème inverse 1D gouverné par l'équation de Schrödinger. Le problème est ramené à un problème inverse spectral, et un algorithme de reconstruction est présenté et étudié du point de vue de la convergence. Cet algorithme n'a toutefois pas été mis en œuvre.

Enfin, le chapitre 4 porte sur l'identification de sources et de données initiales à partir de mesures partielles de la solution. La méthode proposée emprunte la notion d'observateur issue de l'automatique, le retournement temporel étant utilisé de manière itérative. L'algorithme itératif ainsi défini est ensuite amplement étudié pour différents opérateurs, et notamment pour le système de Maxwell. La publication de plusieurs articles, et une contribution à la conférence « Waves'2011 », ont accompagné l'évolution de ce travail.

## Fiche Projet : ASTHER

**Appel à projet : N°7 - Maîtrise de l'environnement thermique - 12 décembre 2008**

**Acronyme du projet : ASTHER**

**Titre du projet : Analyse et Simulation des jets débouchants et de leur impact THERmique**

**Nom et prénom du porteur de projet : Hervé BEZARD - ONERA Centre de Toulouse/DMAE**

**Expert suiveur : Guillaume POLIDORI - Directeur GRESPI/Thermomécanique**

**Coût total du projet : 564 268 €**

**Montant du financement FRAE : 386 076 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) - Toulouse
- Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)
- AIRBUS

### Résumé du projet :

Le projet ASTHER consiste à améliorer la compréhension et les méthodes de prévision des jets chauds débouchants dans un écoulement transverse froid ainsi que leur impact thermique sur les parois. Cet écoulement concerne de nombreuses applications : avions civils et militaires, hélicoptères, turbomachines, missiles.

Il se propose d'évaluer les méthodes hybrides RANS/LES en terme de précision et de coût pour évaluer la faisabilité d'introduire ces méthodes au niveau du design, et de pallier les défauts des modèles de turbulence actuels implantés dans les codes de calcul RANS.

Le projet ASTHER se base à la fois sur les informations fines de turbulence données par une simulation LES de jet débouchant et sur les données d'une expérience de jet débouchant précédemment menée avec AIRBUS dans le cadre du projet MAEVA et qui sera reconduite pour compléter plus finement la base de données existantes.

Ce projet permettra à terme une meilleure compréhension des phénomènes dynamiques et thermiques dans les configurations de jet débouchant dans un écoulement transverse ainsi qu'une amélioration significative des méthodes de calcul aérothermiques.

L'utilisation de ces méthodes de calcul améliorées, au lieu des méthodes de type base de données, permettra un meilleur dimensionnement de ces configurations et donc une réduction des coûts pour les industriels. La meilleure compréhension des phénomènes physiques facilitera également l'application de techniques de contrôle d'écoulement qui est un enjeu pour les industriels.

Le modèle RANS proposé dans ce projet sera intégré dans une version officielle du code elsA de l'ONERA et immédiatement disponible pour les applications industrielles par tous les bénéficiaires du code (AIRBUS, SNECMA, EUROCOPTER...). La base de données expérimentale complète (MAEVA + ASTHER) sera disponible pour les partenaires industriels de la Fondation. Enfin le projet aboutira à l'établissement d'une méthodologie pour mener les calculs hybrides RANS/LES dans un cadre industriel.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

- [1] S. Bocquet, J-C. Jouhaud and P. Sagaut, "A compressible wall model for large-eddy simulation with application to prediction of aerothermal quantities", **Physics and Fluids**, 24:065103, 2012.
- [2] S. Bocquet, P. Sagaut and J-C. Jouhaud, "An Improved Wall-Modelling for Large-Eddy Simulation of Compressible Flows", **6th ECCOMAS Congress**, Vienna, Austria, September 10-14, 2012.
- [3] D. Donjat, H. Bézard, F. Benyoucef, P. Reulet, F. Micheli, "Étude et simulation d'un jet chaud débouchant dans un écoulement transverse", **Congrès Français de Thermique**, Gérardmer, 28-31 mai 2013.

Liste des brevets déposés : néant

### Analyse succincte de la complétude de l'action

Sources : *Rapport final expert ASTHER*

Lors de la réunion finale du projet ASTHER, ayant pour objectifs initiaux la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans les jets débouchant en écoulement transverse ainsi que l'amélioration d'une méthode prédictive dans un processus de design industriel, qui s'est déroulée à l'ONERA Toulouse le 10 décembre 2012, une présentation détaillée de la réalisation des tâches 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 et 3.2 a été faite. La robustesse des analyses et démarches est à souligner, les conclusions de ce projet sont importantes (y compris l'échec du modèle RANS) et répondent aux objectifs initiaux.

## Fiche Projet : COMIFO

**Appel à projet : N°7 - Maîtrise de l'environnement thermique - 12 décembre 2008**

**Acronyme du projet : COMIFO**

**Titre du projet : Convection Mixte et Forcée autour d'un Obstacle chauffé –  
métrologie et modèles réduits pour le contrôle**

**Nom et prénom du porteur de projet : Daniel PETIT – LET (ENSMA)**

**Expert suiveur : Nasser DARABIHA - Ecole Centrale Paris**

**Coût total du projet : 922 412 €**

**Montant du financement FRAE : 407 054 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- ENSMA, Université de Poitiers et UPR CNRS 6608  
Laboratoire d'Etudes Thermiques (LET) – Branche Thermique de l'Institut P'
- ENSMA, Université de Poitiers et UPR CNRS 6609  
Laboratoire d'Etudes Aérothermiques (LEA)
- UMR CNRS 6595, Marseille  
Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI)

### Résumé du projet :

Ce projet est axé sur l'étude d'écoulements de convection mixte/forcée autour d'un cylindre chauffé, à travers un dispositif expérimental, des simulations fines (DNS, LES) et des modélisations d'ordre faible (MIM, POD) destinées au contrôle. Le volet expérimental concernera des mesures spatiotemporelles de vitesse (PIV) et de température (LIF à mettre au point dans l'air) pour la création d'une base de données. Les topologies d'écoulements instationnaires observées et les champs de température associés contribueront à valider les codes numériques (méthode de continuation, frontières immergées). Des modèles d'ordre faible seront construits d'une part à partir de ces codes, et d'autre part à partir des données expérimentales. Ces modèles serviront à la maîtrise de la température en des zones cibles et au contrôle du sillage, par des actionneurs thermiques et/ou dynamiques dégagés lors de la phase expérimentale.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

- **Articles internationaux à comité de lecture**

[1] M. BOIRLAUD, D. COUTON, F. PLOURDE, *Direct numerical simulation of the turbulent wake behind a heated cylinder*, **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 38, pp 82-93, décembre 2012

[2] M. BOIRLAUD, D. COUTON, F. PLOURDE, *Flow structure behind a heated cylinder at  $Re = 1000$  under a mixed convection flow*, **International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science**

#### ■ Conférences internationales ou nationales à comité de lecture

[3] M. BOIRLAUD, D. COUTON, F. PLOURDE, «*Structures cohérentes dans le sillage turbulent d'un cylindre horizontal en régime de convection mixte* », **Congrès Français de Thermique, SFT-2011**, 24-27 mai 2011, Perpignan

[4] M. BOIRLAUD, D. COUTON, F. PLOURDE, «*Effects of buoyancy on the turbulent wake of a horizontal cylinder in cross-flow*», **3<sup>rd</sup> International Symposium on turbulent flows, ASME 2012**, 8-12 July 2012, Puerto-Rico, USA

[5] M. BOIRLAUD, D. COUTON, F. PLOURDE, «*Experimental turbulent mixed convection behind a heated cylinder*», **6<sup>th</sup> European Thermal Sciences Conference Eurotherm 2012**, 4-7 Septembre 2012, Poitiers – Futuroscope France – **Journal of Physics : Conference Series, vol. 395-012096**, 2012

[6] M. BOIRLAUD, D. COUTON, F. PLOURDE, «*Study of the turbulent wake behind a cylinder for different Richardson numbers*», **7<sup>th</sup> International Symposium on Turbulence Heat and Mass Transfer, THMT'12**, 24-27 Septembre 2012, Palerme, Sicile, Italie

[7] L. CORDIER, M. GIRAULT, D. PETIT, «*Reduced Order Modeling by Modal Identification Method and POD-Galerkin approach of the heated circular cylinder wake in mixed convection*», **6<sup>th</sup> European Thermal Sciences Conference Eurotherm 2012**, 4-7 Septembre 2012, Poitiers - Futuroscope France - **Journal of Physics : Conference Series, vol 395-012102**, 2012

#### ■ Rapport de stage ingénieur

[8] T. PERRIN , « *Etude expérimentale du sillage thermique d'un cylindre chauffé en convection mixte turbulente* », **rapport de stage ingénieur ENSMA**, septembre 2012

#### ■ Thèse en relation avec le projet

[9] Matthieu BOIRLAUD, « *contribution à l'étude de la convection mixte en régime turbulent* », **Thèse de doctorat**, Poitiers, novembre 2012

**Liste des brevets déposés :** néant

#### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert COMIFO*

L'objectif de ce projet était la réalisation d'une veine de soufflage d'air pour effectuer des études sur la convection mixte autour d'un cylindre chauffé. Les études consistent à la mise en place de techniques de mesures de vitesse et de température d'une part, et aux simulations DNS et LES sur la même géométrie d'autre part.

Les travaux de la tâche 1 concernent la réalisation et l'implantation d'une soufflerie à l'ENSMA. Ils ont été réalisés en partie par un doctorant financé par la FRAE. La soufflerie comprend une zone d'entrée, une chambre de tranquillisation, un convergent, une veine d'essais de 1mx1mx3m, un divergent, un ventilateur, une évacuation et une zone de filtration. Les profils de vitesse de la veine d'essais ont été mesurés par la PIV 2D. Un système de déplacement 3D a été mis en place permettant le déplacement du laser et celui

de la caméra CC. Cette soufflerie a permis de réaliser des expériences avec une gamme de vitesses allant de 0,3 m/s jusqu'à 17 m/s. Il n'a pas été possible de réaliser les travaux expérimentaux utilisant la technique de PLIF initialement prévue en raison de problèmes de sécurité liés à l'utilisation d'un laser ainsi que le gaz traceur acétone (inflammable). Néanmoins un banc d'essai à l'échelle réduite a été développé pour réaliser des mesures de PLIF sur la convection mixte turbulente en espace libre. Les mesures ont été effectuées dans les plans verticaux et horizontaux par rapport à l'axe central du cylindre. Les mesures ont mis en évidence les difficultés de leur réalisation en particulier celles liées à l'ensemencement de particules. Le cylindre a été équipé de trois thermocouples permettant le contrôle en temps réel des conditions de fonctionnement. Plusieurs régimes de fonctionnement ont été caractérisés. A l'issue des trois premières années du projet, deux bancs d'essais ont été mis en place, un banc à l'échelle 1 et un à l'échelle réduite. La période 2013-2014 sera consacrée aux tests de la veine et aux mesures par PIV.

La tâche 2 concerne les travaux de simulations numériques effectués par l'IUSTI et l'équipe COST. L'objectif de ces travaux est d'étudier les écoulements de convection mixte et la transition laminaire/turbulent. L'équipe COST a effectué la majeure partie des simulations DNS et les simulations LES prévues dans le projet initial n'ont été faites que sur une configuration de convection mixte autour d'un cylindre chauffé pour être comparées aux résultats de DNS. Les simulations ont permis d'étudier plusieurs configurations, mais un certain nombre d'entre elles sont en cours. L'analyse 3D n'a pas été effectuée. L'étude de l'influence du nombre de Richardson pour comprendre les mécanismes de transition reste à faire.

La tâche 3 est la suite de la tâche 1. Ces travaux ont concerné la caractérisation de la veine d'essai, notamment la transition vers la turbulence, en utilisant la vélocimétrie à fil chaud et la PIV. Le cylindre chauffé a été instrumenté pour l'analyse des mécanismes physiques mis en jeu. Initialement prévus pour des écoulements isothermes, anisothermes, et de convection mixte, les essais ont permis la constitution de bases de données expérimentales essentiellement en régime anisotherme. Les résultats sont à comparer avec ceux des simulations de la tâche 2. Les mesures de vitesse et de température constituent des bases de données pour valider les résultats de la tâche 4. Des retards ont été pris par rapport au planning initial sur l'avancement des mesures. De nombreuses campagnes de mesures ont permis l'analyse de l'écoulement autour d'un cylindre et de l'influence des différents paramètres sur la structure de l'écoulement. L'influence du nombre de Richardson est encore mal connue. Il reste également à effectuer l'étude de la rotation du cylindre pour en analyser l'influence sur la transition.

La tâche 4 concerne le développement de modèles mathématiques de petite taille pour le contrôle thermique et dynamique en temps réel du sillage en aval d'un obstacle en utilisant une boucle de rétroaction. Deux méthodes de réduction de modèle POD-Galerkin et MIM ont été utilisées. Elles sont basées sur des modèles d'ordre faible comprenant un nombre restreint d'équations et utilisent une projection de Galerkin des équations de convection mixte. Une formulation générale de modèles réduits d'écoulements de convection mixte, commune aux deux approches, a été proposée. La MIM a été appliquée sur deux configurations bidimensionnelles avec des conditions aux limites constantes. L'étape suivante, actuellement en cours, consiste à enrichir la base de données utilisée pour la construction des modèles réduits. La construction de modèles réduits à partir de données expérimentales obtenues sur la veine COMIFO est l'objectif à court terme.

## Fiche Projet : MATRAS

**Appel à projet : N°7 - Maîtrise de l'environnement thermique - 12 décembre 2008**

**Acronyme du projet : MATRAS**

**Titre du projet : MACHine Thermique pour Refroidissement Actif d'un Satellite**

**Nom et prénom du porteur de projet : Catherine COLIN – IMFT Toulouse**

**Expert suiveur : Amaury LARUE DE TOURNEMINE - CNES**

**Coût total du projet : 1 220 701 €**

**Montant du financement FRAE : 600 003 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- INSA de Lyon, Université Claude-Bernard Lyon 1 et UMR CNRS 5008  
Centre d'Energétique et de **Th**ermique de Lyon (CETHIL)
- Université Paul Sabatier Toulouse, INP Toulouse et UMR CNRS 5213  
**LA**boratoire **PL**asma et **C**onversion d'**E**nergie (LAPLACE)
- ENSMA, Université de Poitiers et UPR CNRS 3346  
Laboratoire d'**E**tudes **Th**ermiques (LET) – Branche Thermique de l'Institut P'
- INES/CEA  
Laboratoire **E**changeurs **Th**ermiques (LeTh)
- Thales Alenia Space France

### Résumé du projet :

En accord avec les spécifications d'un industriel du spatial, le projet consiste à concevoir et tester une boucle diphasique de type machine frigorifique destinée à évacuer efficacement, à haute température, la chaleur qui sera dissipée par les composants électroniques d'un satellite de télécommunication futur dit forte puissance (10kW de dissipation thermique).

Les échangeurs thermiques de la boucle (évaporateurs, condenseurs) seront dimensionnés par une approche théorique puis caractérisés à l'aide d'une étude expérimentale dédiée. Ils seront finalement intégrés dans la boucle complète qui sera construite et testée en deuxième partie de projet.

Les retombées techniques sont inhérentes au projet. Elles concernent la validation du concept novateur de l'utilisation d'un groupe froid pour le refroidissement de satellites au travers de la réalisation d'un prototype de 10kW et d'une modélisation système associée. Afin d'exploiter au mieux ce prototype, le travail d'instrumentation se fera au plus près des phénomènes physiques à étudier.

L'ensemble des études à mener permettra de faire progresser la communauté scientifique sur de nombreux problèmes fondamentaux comme : la modélisation de l'ébullition convective en microgravité, la conception de géométries optimales d'évaporateurs par approche constructale et la condensation convective dans des régimes intermédiaires très peu explorés.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

[1] Hugon J., "Définition architecture HPS MATRAS", **rapport TAS – Ref MATRAS – TN- 002**, mars 2011.

[2] Hachani B. L. , Revellin R., Bonjour J., *“Rapport sur la proposition d'un design d'évaporateur optimal”*, **rapport CETHIL – Ref MATRAS – TN –003**, mars 2011.

[3] Boujida B. Cioria D., Voinis A., Colin C., *“Dimensionnement d'un évaporateur pour une boucle de contrôle thermique d'un satellite de communication”*, **Rapport de BEI ENSEEIHT- IMFT**, Mars 2012.

[4] Colasson S., **Rapport technique DTS/RT/DR/2012/361**, CEA LETh, décembre 2012.

[5] Ayel V., Romestant C., *“Caractérisation expérimentale du prototype 10kW”*, **Rapport PPRIME**, mars 2013.

[6] Pallarols L., Sanchez de Muniain M., Colin C., *“Etude d'un Evaporateur tubulaire pour le refroidissement de composants électroniques d'un satellite”*, **Rapport de BEI ENSEEIHT-IMFT**, Mars 2013.

#### ■ Journaux avec comité de lecture

[7] G. El Achkar, P. Lavieille, M. Miscevic, *“Loop heat pipe and capillary pumped loop design: About heat transfer in the isolated bubbles zone of condensers”*, **Applied Thermal Engineering** **33-34** (2012) 253-257.

[8] G. El Achkar, P. Lavieille, J. Lluc, M. Miscevic, *“Heat transfer and flow distribution in a multichannel microcondenser working at low mass fluxes”*, **Int. J. Heat Mass Transfer** **54** (2011) 2319-2325.

[9] G. El Achkar, M. Miscevic, P. Lavieille, J. Lluc, J. Hugon, *“Flow patterns and heat transfer in a square cross-section micro condenser working at low mass flux, Applied Thermal Engineering, In Press. for space electronics cooling: entropy generation minimization approach”*, **Heat Transfer Engineering, Vol. 34, pp. 1-10**, 2013.

[10] G. El Achkar, P. Lavieille, J. Lluc, M. Miscevic, *“Heat transfer and flow distribution in a multichannel microcondenser working at low mass fluxes”*, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, In press.

#### ■ Conférences internationales avec actes

[11] Nancy M., De Malmazet E., Colin C., *“Flow boiling in straight heated tubes under microgravity conditions, ECI 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer”*, **Lausanne, Switzerland**, 3-7 June 2012.

[12] Nancy M., De Malmazet E., Colin C., *“Flow boiling in straight heated tubes under microgravity conditions, 8th International Conference on Multiphase Flow”*, **Jeju, Korea**, May 26 - 31, 2013

[13] G. El Achkar, P. Lavieille, J. Lluc, M. Miscevic, *“Experimental study of the behavior of a multichannel microcondenser working at low mass fluxes”*, **Second European Conference on Microfluidics 2010** – Toulouse, December 8-10, 2010.

[14] Miscevic M., El Achkar G., Lavieille P., Kaled A., Dutour S., *“About flow regime and heat transfer in low diameter condenser of LHP and CPL”*, **16th International Heat Pipe Conference (16th IHPC)**, Lyon, France, May 20-24, 2012.

[15] El Achkar G., Miscevic M., Lavieille P., Lluc J., Hugon J., “*Flow patterns and heat transfer in a square cross-section micro condenser working at low mass fluxes*”, **3rd Micro and Nano Flows Conference**, Thessaloniki, Greece, August 22-24, 2011, paper 30, CD-ROM.

■ **Conférences internationales sans acte**

[16] Hugon J., Miscevic M., Lavieille P., El Achkar G., de Malmazet E., Colin C., Revellin R., Bonjour J., Ayel V., Romestant C., Lassachagne L., Collasson S., “*Design of an original vapour-compression refrigeration system for cooling electronic components in satellites*”, **4th International Symposium on Physical Sciences in Space**, 11 – 15 Juillet 2011, Bonn - Bad Godesberg, Germany

[17] De Malmazet E., Colin C., “*Flow boiling in straight tubes in microgravity*”, **Sixth International Conference on Two-Phase Systems For Ground And Space Applications**, Cava de’ Tirreni, Italy, September 25-28, 2011

[18] Narcy M., De Malmazet E., Colin C., “*Flow Boiling in straight tube under microgravity conditions*”, **Seventh international symposium on two-phase systems for ground and space applications**, Beijing, China, September 17- 21, 2012

[19] El Achkar G., Miscevic M., Lavieille P., Hugon J., “*Condensation flow in a square cross-section micro channel with low gravity effect: case of intermediate mass velocities*”, **Seventh International Symposium on two-phase systems for ground and space applications**, Beijing, China, September 17-21, 2012

[20] El Achkar G., Miscevic M., Lavieille P., “*Flow patterns and heat transfer during condensation flow in a square cross-section micro channel: effects of fluid properties and mass velocity*”, **Eighth International Topical Team Workshop on two-phase systems for ground and space applications**, Bremen, Germany, September 17-19, 2013

■ **Conférences nationales avec actes**

[21] G. El Achkar, P. Lavieille, M. Miscevic, J. Lluc, “*Analyse Des Transferts De Chaleur Dans La Zone A Bulles Isolées D’un Ecoulement De Condensation En Microcanal*”, **Congrès Français De Thermique**, Perpignan 24-27 Mai 2011

[22] El Achkar G., Lavieille P., Hugon J., Miscevic M., “*Mise En Evidence Du Fort Déséquilibre Thermique Entre Phases Lors De La Condensation Convective De Bulles A L’intérieur D’un Micro Tube De Section Carrée*”, **Congrès Société Française De Thermique**, Gerardmer, France, Mai 28-31, 2013

**Liste des brevets déposés :** néant

**Analyse succincte de la complétude de l’action**

*Sources : Rapport final MATRAS*

Globalement, le projet MATRAS est une réussite technologique et scientifique. De nombreux articles de qualité ont été écrits lors de ce projet. Par ailleurs, c’est par le biais de ce type d’activité qu’il est possible de rapprocher les communautés scientifiques de la communauté industrielle; le travail en

collaboration étant toujours profitable pour les deux communautés.

Sur le plan de l'évaluation technologique du prototype, elle pourra se faire dans la continuité du projet MATRAS lors de la réalisation de contrats de Recherche et Technologie cofinancés par TAS et le CNES. A ce titre, les activités suivantes sont en cours :

- étude comparative de plusieurs solutions de compression mécanique.
- étude comparative de plusieurs solutions technologiques de panneaux isolants.
- exploitation expérimentale et numérique du prototype MATRAS.

## Fiche Projet : SONOTHERMOGRAPHIE

**Appel à projet : N°7 - Maîtrise de l'environnement thermique - 12 décembre 2008**

**Acronyme du projet : SONOTHERMOGRAPHIE**

**Titre du projet : THERMOGRAPHIE infrarouge de champs ultra SONOres en vue de l'évaluation et du contrôle non destructif des matériaux composites**

**Noms et prénoms des porteurs de projet : Christophe BACON - LMP**

**Jean-Christophe BATSALE – TREFLE**

**Expert suiveur : Jean-Pierre DUMAS - LaTEP**

**Coût total du projet : 282 000 €**

**Montant du financement FRAE : 210 000 €**

**Durée : 36 mois**

### **Noms des partenaires du projet et organismes :**

- ENSAM Bordeaux et UMR CNRS 8508  
Transferts Ecoulements FLuides Energétique (TREFLE)
- Université de Bordeaux et UMR CNRS 5469  
Laboratoire de Mécanique Physique (LMP)

*Ces deux laboratoires ont fusionné au 01/01/2011 pour devenir l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M).*

### **Résumé du projet :**

SONOTHERMOGRAPHIE est un projet commun à 2 laboratoires (LMP, TREFLE) pour mettre à profit leur savoir-faire complémentaire dans le domaine de la propagation des ondes acoustiques (LMP) et des phénomènes thermiques (TREFLE).

Ce projet s'inscrit dans une recherche à long terme pour la compréhension des phénomènes de dégradation d'énergie mécanique en chaleur. L'étape proposée dans ce projet consiste à explorer une nouvelle méthode d'évaluation et de contrôle non destructif des matériaux par champ thermique induit par ondes ultrasonores de puissance. Le champ thermique induit par les pertes dans les matériaux anisotropes absorbants, en particulier les composites à matrice polymère, est porteur de 2 types d'information :

- une information sur les caractéristiques thermiques du matériau,
- une information sur les éventuels défauts présents dans la structure.

Ce projet a donc un double but :

- l'évaluation des propriétés thermiques anisotropes des matériaux composites,
- le contrôle non-destructif par une méthode « grand champ » des structures en composites.

La méthode proposée est originale, a fait l'objet de publications récentes au LMP et a été testée sur des structures simples en laboratoire.

Elle doit permettre l'évaluation des conductivités anisotropes de ces matériaux pour laquelle les retombées scientifiques sont très importantes pour la communauté des thermiciens. D'autre part, le développement de caméras infrarouges très sensibles et bon marché, permettra de développer cette méthode de contrôle non-destructif, sans contact, rapide et relativement peu coûteuse, en milieu industriel.

D'autre part la simulation par éléments finis pour prédire les champs thermiques générés par ondes acoustiques sera réalisée à l'aide d'un logiciel commercial multiplateforme (COMSOL) dont l'utilisation est facilement transférable à l'industrie.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

[1] Hosten B., Biateau C., Bacon C., Pradere C., Batsale J.C., Meziane A., *Sonothermography in composite materials: Finite Element modeling and experimental validation*. **NDT & E International**, Vol. 51, pp. 120-126, DOI 10.1016/j.ndteint.2012.04.009, 2012.

[2] Kouadio T., Pradere C., Meziane A., Bacon C., Batsale J.C., *Thermal characterization of homogeneous materials using a virtual function*. **11th Quantitative InfraRed Thermography**, Naples, Italy, June 11-14, 2012.

[3] Kouadio T., Meziane A., Pradere C., Bacon C., Batsale J.C., *Thermographie infrarouge de champ ultrasonore en vue de l'évaluation et du contrôle non destructif de matériaux composites : estimation de la diffusivité thermique par une méthode de formulation faible d'ordre réduit de l'équation de la chaleur*. **Congrès Français de Thermique**, Bordeaux, France, 29/05-01/06, pp. 714-722, 2012.

[4] Kouadio T., Meziane A., Pradere C., Bacon C., Batsale J.C., Biateau C., *Thermal Characterization Of Viscoelastic Materials Using Sonothermography*. **40th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, Baltimore, US, July 21-26 2013, Ed. Donald O. Thompson, Dale E. Chimenti, Vol. 1581 33A, pp. 1671-1678, DOI 10.1063/1.4865024, 2014

**Liste des brevets déposés :** néant

### Analyse succincte de la complétude de l'action

*Sources : Rapport final expert SONOTHERMOGRAPHIE*

En conclusion sur ce travail scientifique, on peut affirmer que le but a été atteint puisque des caractéristiques thermiques isotropes ou anisotropes ont pu être déterminées par la méthode préconisée à partir de mesures bruitées et que la méthode de détection des défauts a été modélisée. Toutefois ce travail est vraiment en amont et les applications industrielles de routine ne peuvent pas être facilement mises en œuvre. En particulier l'analyse par la méthode LOWF dépend de la forme de l'échantillon et devrait être adaptée à une forme et un maillage plus complexe. Bien que peu d'informations soient données, les temps de calcul devraient être diminués (modèles réduits?).

Ce programme a aussi démontré la pertinence d'une approche transdisciplinaire ajoutant les compétences en mécanique-acoustique et en optique IR-méthodes inverses. Le rapporteur peut aussi témoigner de la bonne entente des deux Equipes et de la volonté de mêler les deux cultures.

## Fiche Projet : SYRTIPE

**Appel à projet : N°7 - Maîtrise de l'environnement thermique - 12 décembre 2008**

**Acronyme du projet : SYRTIPE**

**Titre du projet : SYstèmes de Refroidissement Thermique Intelligent Pour l'Electronique embarquée**

**Nom et prénom du porteur de projet : Marc MISCEVIC – LAPLACE Toulouse**

**Expert suiveur : Ludovic PERRIN - CNES**

**Coût total du projet : 818 300 €**

**Montant du financement FRAE : 371 000 €**

**Durée : 36 + 6 = 42 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- Université Paul Sabatier Toulouse, INP Toulouse et UMR CNRS 5213  
**LAB**oratoire **PL**asma et **C**onversion d'Énergie (LAPLACE)  
**G**roupe de **R**echerche **E**nergétique, **P**lasma, **H**ors-Équilibre (GREPHE)
- Université Paul Sabatier Toulouse, INP Toulouse et UMR CNRS 5213  
**LAB**oratoire **PL**asma et **C**onversion d'Énergie (LAPLACE)  
**G**roupe de **R**echerches en **E**lectrodynamique, **M**atériaux, **M**achines et **M**écanismes  
**E**lectroactifs (GREM3)
- UMR CNRS 6595, Marseille  
Institut **U**niversitaire des **S**ystèmes **T**hermiques **I**ndustriels (IUSTI)

### Résumé du projet :

En termes d'intensification des transferts thermiques, on distingue les techniques actives et passives. Même si des potentialités d'optimisation des techniques passives demeurent, les très forts flux de chaleur dissipés par l'électronique moderne nécessiteront à court terme d'aller plus loin que leur simple mise en œuvre. Parallèlement aux recherches sur l'intensification des transferts thermiques, d'importantes avancées ont été réalisées dans le domaine électromécanique. Le « morphing électro actif » est une voie particulièrement prometteuse pour augmenter les perturbations des couches limites tout en permettant d'avoir une action de contrôle sur les écoulements et les transferts. De plus il s'adapte bien au cas des microcanaux de part même la nature des concepts mis en jeu. Dans ce contexte, l'objectif du projet est de développer un démonstrateur de système d'échange thermique miniaturisé utilisant le changement d'état dans des canaux dont les parois se déforment de manière contrôlée en fréquence et en amplitude.

Ce projet a pour ambition de concevoir de nouveaux systèmes de refroidissement auto-adaptatifs pour l'électronique embarquée, en rupture technologique avec les systèmes existants. Pour cela, il se propose d'exploiter simultanément

- l'intensification des transferts provoquée par la réduction des dimensions caractéristiques (microfluidique),
- le morphing électroactif des parois dans un objectif d'une part d'intensification des transferts et d'autre part de contrôle des instabilités,
- les transferts importants d'énergie mis en jeu lors du changement d'état liquide-vapeur.

Les résultats scientifiques attendus sont

- la démonstration de l'apport des solutions électromécaniques sur l'intensification et le contrôle des transferts de chaleur et de masse,

- la démonstration des capacités d'intégration et l'efficacité énergétique des systèmes électroactifs dans des dispositifs submillimétriques,
- l'analyse des mécanismes d'interaction fluide-structure à l'échelle micrométrique,
- la qualification, la modélisation et l'optimisation des systèmes électromécaniques autonomes, ainsi que l'étude de l'autoadaptation de ces solutions électromécaniques aux contraintes thermiques,
- la réalisation et les tests d'un démonstrateur de système thermique « intelligent ».

#### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

##### ■ Chapitres de livres

[1] Kumar P., Topin F., Miscevic M., Lavieille P., Tadrict L., *Heat transfer enhancement in short corrugated mini-tubes*, **Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer in Porous Media**, Springer-Verlag. 27 (2012) 181-208

##### ■ Articles de revues

[2] Amokrane M., Nogarède B., *Thermoelectric conversion of heat fluxes: analytical and experimental approach*, **Smart Materials and Structures** 21(8) (2012), p. 085018.

[3] Kumar P., Topin F., Tadrict L., *Enhancement of Heat Transfer over Spatial Stationary and Moving Sinusoidal Wavy Wall: A Numerical Analysis*, *Defect and Diffusion Forum* 326-328 (2012) 341347

[4] Léal L., Lavieille P., Miscevic M., Pigache F., Tadrict L., *Control of pool boiling incipience in confined space : dynamic morphing of the wall effect*, **Applied Thermal Engineering** 51 (2013) 451-458

[5] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Amokrane M., Pigache F., Topin F., Nogarède B., Tadrict L., *An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives : focus on active methods using electroactive materials*, **Int. J. Heat Mass Transf.** 61 (2013) 505-524

[6] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Pigache F., Topin F., Tadrict L., *Simultaneous integration, control and enhancement of both fluid flow and heat transfer in small scale heat exchangers : a numerical study*, en cours de révision à la date d'écriture du rapport

##### ■ Communications dans des congrès

[7] Léal L., Lavieille P., Miscevic M., Tadrict L., *Modélisation hydrodynamique d'un fluide en espace confiné sous l'effet de la déformation entretenue d'une paroi en vue de contrôler le déclenchement de l'ébullition*, **Congrès SFT10**, pp 487-492

[8] Léal L., Lavieille P., Miscevic M., Pigache F., Tadrict L., *Etude expérimentale du contrôle du déclenchement de l'ébullition en espace confiné déformation dynamique de paroi*, **Congrès SFT11**

[9] Kumar P., Topin F., *Transferts de chaleur dans un tube déformé : Approche numérique de l'impact de la dynamique de déformation*, **Congrès ST11**

[10] Kumar P., Topin F., Tadrict L., *Enhancement of Heat Transfer Over Spatial Stationary and Moving Sinusoidal Wavy Wall: Numerical Analysis*, **DSL2011 Algarve, Portugal**, Juillet 2011

[11] Léal L., Lavieille P., Miscevic M., Pigache F., Tadrists L., *Control of pool boiling incipience in confined space: dynamic morphing of the wall effect*, **3rd Micro and Nano m Flows Conference, Thessaloniki, Greece**, 22-24 August 2011.

[12] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Pigache F., Tadrists L., *Control of pool boiling incipience in confined space: effect the dynamic morphing of the wall*, **Sixth International Conference on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications**, p 15, Cava Di Tirreni, Italy, 2011

[13] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Pigache F., Tadrists L., *Simultaneous cavitation and boiling phenomena effects on the incipience of the nucleation process at the interface of a heated solid and a pure liquid*, **Seventh International Symposium on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications**, Beijing, China, 2012.

[14] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Pigache F., Tadrists L., *Effet de la cavitation et de l'ébullition simultanée sur le processus de nucléation à l'interface d'un solide chauffé et d'un liquide pur en espace confiné*, **JEMP**, 2012

[15] Amokrane M., Baysse A., Nogarède B., Rguiti M., *Low-voltage active diode rectifier for pyroelectric harvesting cell*, in **IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, 2012, 1055-1060

[16] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Tadrists L., Topin F., *Analyse de l'influence des inerties thermique et dynamique sur les conditions de déclenchement de la nucléation*, **Congrès SFT 13**

[17] Amokrane M., Nogarède B., Rivière P., Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Topin F., Tadrists L., *Multicellular piezoelectric actuator for setting in motion fluids, and heat exchange enhancement*, **11th International Workshop IEEE Electronics, Control, Measurement, Signals and their applications to Mechatronics (ECMSM 2013)**, Toulouse, France June 24th-26th 2013

[18] Amokrane M., Baysse A., Rguiti M., Nogarède B., *Pyroelectric power harvesting using a lead-lanthanum-zirconate-titanate (7/60/40 PLZT) pyroelectric cell*, **11th International Workshop IEEE Electronics, Control, Measurement, Signals and their applications to Mechatronics (ECMSM 2013)**, Toulouse, France June 24th-26th 2013

[19] Léal L., Miscevic M., Lavieille P., Topin F., Tadrists L., *Mechanisms of nucleation by simultaneous boiling and cavitation phenomena*, **Eighth International Symposium on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications**, Bremen, Germany, 2013

#### ■ Thèses en relation avec le projet

[20] Laëtitia Léal, *Etude des mécanismes de nucléation par actions simultanées de l'ébullition et de la cavitation*, Thèse de l'Université de Toulouse, décembre 2012

[21] Mounir Amokrane, *Etude et mise en œuvre de couplage thermoélectrique en vue de l'intensification d'échange de chaleur par morphing électroactif*, Thèse de l'Université de Toulouse, soutenance prévue mai/juin 2013

#### Liste des brevets déposés :

Topin F., Miscevic M., Lavieille P., Léal L., Tadrists L., Nogarède B., Pigache F., Amokrane M., *Conduit constitutif d'un échangeur de chaleur et échangeur de chaleur comprenant un tel conduit*, **Brevet**

**Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert SYRTIPE*

Les conclusions sur le déroulement du projet SYRTIPE sont les suivantes. Au niveau technique, tous les objectifs fixés au démarrage de l'activité ont été atteints, certains ayant même été dépassés. Les points suivants sont identifiés comme ayant un fort pouvoir innovant :

- contrôle d'ébullition par déformation dynamique d'une paroi ;
- intensification des transferts par déformation d'une paroi en onde progressive ;
- disponibilité d'un démonstrateur complet fonctionnel.

Sur le plan financier, les ressources attribuées ont été utilisées conformément à la proposition initiale.

Par ailleurs, il est à noter que concernant le rayonnement du projet SYRTIPE, une importante campagne de communication a été menée, comme en attestent les nombreuses publications et présentations dans des congrès.

## Fiche Projet : ASCERT

**Appel à projet : N°6 – Méthodes de vérification des systèmes et logiciels –**

10 juin 2008

**Acronyme du projet : ASCERT**

**Titre du projet : Analyses Statiques CERTifiées**

**Nom et prénom du porteur de projet : David PICHARDIE – IRISA**

**Expert suiveur : Éric GOUBAULT – CEA Saclay**

**Coût total du projet : 321 570 €**

**Montant du financement FRAE : 321 570 €**

**Durée : 36 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- INRIA et UMR CNRS 6074  
Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA)
- Ecole Normale Supérieure

**Résumé du projet :**

Nous proposons d'étudier la certification formelle des analyses statiques en utilisant l'assistant de preuve Coq. Nous aborderons plusieurs techniques permettant de démontrer mécaniquement la validité sémantique du diagnostic d'un analyseur : programmation certifiée correcte de l'analyseur, certification d'un vérificateur de résultat et validation déductive des invariants générés par un analyseur. Nous étudierons plusieurs composants clés de l'analyseur Astrée. Notre première tâche se consacrera à la certification des opérateurs de la bibliothèque de domaines abstraits Apron. Nous étudierons ensuite un interpréteur abstrait avant/arrière pour un langage impératif simple. Enfin nous relierons cet interpréteur à une des sémantiques formelles de C, développés dans le projet CompCert. Tous ces objectifs ont pour ambition commune de pouvoir, au terme du projet, évaluer le coût d'une certification formelle d'un tel analyseur.

**Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):**

[1] F. Besson, P.-E. Cornilleau, T. Jensen, *Result Certification of Static Program Analyzers with an SMT*

[2] S. Blazy, V. Laporte, A. Maroneze, D. Pichardie, *Formal Verification of a C Value Analysis Based on Abstract Interpretation*

[3] G. Barthe, D. Demange, D. Pichardie, *A formally verified SSA-based middle-end - Static Single Assignment meets CompCert*, **ESOP 12**, 2012

[4] V. Robert, X. Leroy, *A formally-verified alias analysis*, **CPP 12**, 2012

[5] P. Cousot, R. Cousot, L. Mauborgne, *Theories, solvers and static analysis by abstract interpretation*, **Journal of the ACM**, 2012

[6] F. Besson, P.-E. Cornilleau, D. Pichardie, *Modular SMT proofs for fast reflexive checking inside Coq.*, **CPP 11**, 2011

- [7] P. Cousot, R. Cousot, L. Mauborgne, *The Reduced Product of Abstract Domains and the Combination of Decision Procedures*, **FOSSACS 11**, 2011
- [8] X. Leroy, *Verified squared: does critical software deserve verified tools?*, **POPL 11**, 2011
- [9] D. Cachera, D. Pichardie, *Programmation d'un interpréteur abstrait certifié en logique constructive*, **TSI**, 2010
- [10] D. Pichardie, *(Partially) Certified Abstract Interpreters*, **NSAD 10**, 2010
- [11] D. Cachera, D. Pichardie, *A certified denotational abstract interpreter*, **ITP 10**, 2010
- [12] P. Cousot, R. Cousot, L. Mauborgne, *Logical Abstract Domains and Interpretations*, **The Future of Software Engineering**, 2010
- [13] F. Besson, T. Jensen, D. Pichardie, T. Turpin, *Certified result checking for polyhedral analysis of bytecode programs*, **TGC 2010**, 2010
- [14] X. Leroy, *Mechanized semantics*, **Marktoberdorf 2010**, 2010
- [15] F. Besson, D. Cachera, T. Jensen, D. Pichardie, *Certified static analysis by abstract interpretation*, **FOSSAD 2009**, 2009

■ **Thèses en relation avec le projet**

- [16] Pierre-Emmanuel Cornilleau, *Certification of Static Analysis in Many-Sorted First-Order Logic*

**Liste des brevets déposés :** néant

**Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert ASCERT*

Les livrables à fin parcours ont été les suivants :

- Certification des opérateurs abstraits de la bibliothèque Apron. Cette partie a abouti à des résultats plus approfondis que promis à l'origine. Elle a permis entre autres de développer un validateur de preuve, lui-même certifié en COQ, de formules d'arithmétique linéaire combinées avec des fonctions non-interprétées.
- Interpréteur abstrait certifié pour un langage impératif simple. Cette partie a été bien finalisée, et utilisée de nombreuses fois en public, en particulier dans des écoles d'été.
- Interpréteur abstrait certifié pour la chaîne CompCert. Là encore, le projet a dépassé les espérances, alors que cette tâche était jugée prospective à l'origine.
- Thèse de Pierre-Emmanuel Cornilleau. Là encore des articles sont en cours de soumission, aidant à la bonne dissémination des excellents résultats du projet.

L'avancement du projet semble avoir dépassé les plans initiaux. Beaucoup d'échanges ont eu lieu et chacune des équipes en ont profité, avec entre autres d'excellentes publications.

## Fiche Projet : CAVALE

**Appel à projet : N°6 – Méthodes de vérification des systèmes et logiciels –**

10 juin 2008

**Acronyme du projet : CAVALE**

**Titre du projet : Combinaison d'Analyses pour la Validation des Logiciels Embarqués**

**Nom et prénom du porteur de projet : Pierre-Loïc GAROCHE – ONERA**

**Expert suiveur : François-Xavier DORMOY – Esterel Technologies**

**Coût total du projet : 396 980 €**

**Montant du financement FRAE : 263 985 €**

**Durée : 36 + 18 = 54 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- AIRBUS
- CNRS UMR 5505  
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

**Résumé du projet :**

Les développements récents en aéronautique, comme dans d'autres domaines industriels, ont montré l'importance croissante des systèmes informatiques et en particulier des logiciels critiques au sein des systèmes volants.

Actuellement, la vérification de code embarqué critique est essentiellement effectuée par analyse dynamique sous la forme de jeux de test. Les méthodes formelles, et en particulier les méthodes d'analyse statique, par opposition à l'analyse dynamique, comme le test, seront amenées à jouer un rôle de plus en plus important, compte tenu de l'augmentation de la taille des systèmes ainsi que des exigences de certification. Faire collaborer ces deux approches peut permettre de tirer parti des avantages de chaque technique.

Partant de ce fait, l'objectif de CAVALE est double :

- d'une part, étudier et proposer un cadre pour la collaboration d'analyses statiques afin d'en améliorer la précision et d'en faciliter le passage à l'échelle;
- et d'autre part, permettre une intégration harmonieuse de ces analyses dans les processus de validation et vérification utilisés actuellement.

Pour cela, CAVALE se propose :

- d'étudier la faisabilité de la collaboration forte entre calcul de pré-conditions les plus faibles et interprétation abstraite; dans un premier temps concernant les RTE – les erreurs à l'exécution, puis dans un second temps les propriétés fonctionnelles,
- de faire avancer l'état de l'art en proposant des ponts entre techniques différentes, c'est-à-dire de faire communiquer et collaborer les communautés de l'interprétation abstraite et de la preuve automatisée ou assistée,
- et enfin, d'étudier l'intégration de ces techniques et de leur combinaison dans le cycle actuel de développement; en particulier d'étudier l'impact des tests déjà effectués sur le calcul d'information exhaustive sur le système analysé.

D'un point de vue industriel, les retombées se feront au niveau de la stratégie de V&V et de certification des logiciels, puisque les résultats devraient contribuer à la définition d'un nouveau processus de vérification, recevable d'un point de vue certification et combinant de manière optimale les différentes techniques d'analyse statique, de manière à limiter au strict minimum les phases d'analyse dynamique (test).

### **Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):**

Les travaux réalisés dans cette seconde partie du projet CAVALE ont été présentés tant au Japon (Univ. de Tokyo, NII, AIST Kobe) qu'aux USA (Univ. of Iowa, Carnegie Mellon University, NASA Langley, NASA Ames, Air Force Research Lab). Les aspects intégration au processus de développement, et vérification de propriétés fonctionnelles de type stabilité ont beaucoup intéressé et pourraient être à l'origine de collaborations internationales à venir.

**Liste des brevets déposés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert CAVALE*

Le projet CAVALE s'est bien déroulé et a produit des travaux de qualité. Le volet expérimentation a été démontré en sélectionnant des briques logicielles qui permettront de démontrer l'application de ces techniques sur des cas concrets et complexes. Airbus en tant que partenaire n'a malheureusement pas pu expérimenter les prototypes.

D'un point de vue technique le projet a couvert les ambitions et a même dépassé les objectifs sur certains domaines. Le travail est d'une grande qualité scientifique qui a donné lieu à de nombreuses publications internationales.

## Fiche Projet : SARDANES

**Appel à projet : N°6 – Méthodes de vérification des systèmes et logiciels –**

10 juin 2008

**Acronyme du projet : SARDANES**

**Titre du projet : Sémantique, Analyse et tRansformation Des Applications Numériques Embarquées Synchrones**

**Nom et prénom du porteur de projet : Matthieu MARTEL – ELIAUS-DALI**

**Expert suiveur : Pierre-Loïc GAROCHE – ONERA**

**Coût total du projet : 566 548 €**

**Montant du financement FRAE : 294 224 €**

**Durée : 36 + 8 = 44 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- Université de Perpignan Via Domitia  
ELelectronique, Informatique, AUtomatique et Systèmes (ELIAUS)
- Ecole Normale Supérieure
- Université de Bretagne Occidentale

**Résumé du projet :**

SARDANES a pour objectif d'utiliser des techniques de transformation automatique de programmes pour améliorer la précision des calculs et garantir la préservation des propriétés numériques lors de la compilation de programmes SCADE. Les preuves de correction reposent sur une interprétation abstraite des nombreuses traces d'exécution obtenues en transformant les expressions arithmétiques.

SCADE est un langage largement utilisé pour le développement de systèmes embarqués critiques synchrones. D'abord utilisé pour la spécification, la simulation et la vérification de propriétés de sûreté de haut niveau, ce langage permet aussi de produire un code final via un processus de compilation. Cela devrait signifier que les propriétés prouvées sur le modèle sont bien garanties pour le code objet. Mais un obstacle principal à cela existe : la sémantique de SCADE spécifie que les calculs doivent être effectués en nombres réels. Or le programme final utilise des nombres flottants dont l'arithmétique est très différente de celle des réels, notamment à cause des erreurs d'arrondi.

Les résultats scientifiques attendus pour le projet SARDANES sont de deux ordres :

- théoriques, en ce qui concerne la définition de sémantiques permettant de prouver la correction d'une traduction en C d'un programme SCADE. Ces travaux feront l'objet de communications scientifiques dans les conférences et revues du domaine ;
- expérimentaux, en ce qui concerne la réalisation d'un logiciel permettant d'effectuer les analyses et transformations de codes nécessaires. L'outil sera conçu pour être utilisé de façon complémentaire aux outils SCADE et Astrée.

La principale perspective industrielle est la création d'un nouvel outil implémentant les techniques de compilation et de validation de programmes numériques, qui pourrait à terme s'intégrer dans une chaîne de production et de validation de programmes contenant déjà les logiciels SCADE et Astrée.

**Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):**

Des publications ont été faites dans des conférences internationales et une conférence majeure du domaine de la vérification a été organisée.

**Liste des brevets déposés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert SARDANES*

Le projet SARDANES semble être un réel succès. La méthode proposée dans le projet a été bien étudiée. Elle a même donné lieu à une implémentation utilisable sur des codes industriels et des exemples numériques difficiles.

Du point de vue financier, le projet a utilisé les ressources allouées à bon escient.

Les résultats sont tant théoriques que pratiques et pourront impacter le domaine dans la mesure où ils seraient repris par des industriels. Du point de vue de la valorisation des publications ont été faites dans des conférences internationales et une conférence majeure du domaine de la vérification a été organisée.

## Fiche Projet : CASAREL

**Appel à projet : N°5 – L'électronique de puissance dans les systèmes embarqués –**  
20 novembre 2007

**Acronyme du projet : CASAREL**

**Titre du projet : Concepts Avancés de Sûreté de fonctionnement pour ARchitectures  
Electroniques de puissance**

**Nom et prénom du porteur de projet : Frédéric RICHARDEAU – LAPLACE**

**Expert suiveur : Jean-Paul FERRIEUX – G2ELab**

**Coût total du projet : 1 007 067 €**

**Montant du financement FRAE : 400 000 €**

**Durée : 36 + 6 = 42 mois**

### **Noms des partenaires du projet et organismes :**

- Université Paul Sabatier Toulouse, INP Toulouse et UMR CNRS 5213  
**LAB**oratoire **PLA**sma et **C**onversion d'Énergie (LAPLACE)
- CNRS UMR 5214  
Institut d'Électronique du Sud (IES)
- SNPE Matériaux Energétiques
- AIRBUS FRANCE

### **Résumé du projet :**

Le projet CASAREL a pour ambition de concevoir des solutions innovantes et génériques dédiées à la sécurité passive intégrée et à la redondance intégrée au cœur des convertisseurs. Le sous-projet "Safety" portera sur la conception d'un réseau d'interrupteurs passifs couplés et multifonctionnels permettant : l'isolement électrique spontanée (mode fusible) d'une part, l'isolement électrique déclenché par matériaux énergétiques enfouis (mode interrupteur) d'autre part et enfin le diagnostic passif intégré. La connexion d'un circuit de secours en parallèle sera envisagée dans le cadre des perspectives au sous-projet. Le sous-projet "Fault-Tolerant" portera sur la conception de nouvelles structures de conversion multicellulaires constituées de redondances naturelles en série permettant une tolérance à la première défaillance des composants de puissance. Les solutions issues des deux sous-projets (mise en sécurité, redondances parallèle et série) se complètent parfaitement pour viser des architectures à haut niveau de sûreté de fonctionnement.

### **Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):**

#### ■ **Publications liées au sous-projet SAFETY**

[1] Z. Dou, F. Richardeau, E. Sarraute, J.-M. Blaquièrre, V. Bley, D. Flumian, *Comparison of Short-Circuit Failure Capability of Epoxy Molded Package versus Silicone Gel Module for New Fault-Tolerant Inverter and Interleaved Chopper*, **Power Conversion and Intelligent Motion conference**, May 17<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> 2011, PCIM 2011, Nuremberg

[2] F. Richardeau, Z. Dou, J.-M. Blaqui re, E. Sarraute, D. Flumian, F. Mosser, *Complete Short Failure-Mode Properties and Comparison Based on IGBT Standard Packaging. Application to New Fault-Tolerant Inverter and Interleaved Chopper with Reduced Parts Count*, **14th European Conference on Power Electronics and Applications Conference**, EPE 2011, August 30<sup>th</sup>-September 1<sup>st</sup>, Birmingham, UK

[3] F. Richardeau, Z. Dou, E. Sarraute, J.-M. Blaqui re, V. Bley, D. Flumian, *Comparison of Short-Circuit Failure "Ohmic Mode" of Epoxy Molded Package versus Silicone Gel Module for New Fail-Safe and Interruptible Power Converters*, **21<sup>st</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis**, ESREF 2011 + **Revue ELSEVIER MICROELECTRONICS RELIABILITY**

[4] Z. DOU, F. RICHARDEAU, E. SARRAUTE, V. BLEY, J.-M. BLAQUIERE, C. VELLA. G. GONTHIER, *New design and evaluation of a fully integrated PCB dual-switch fuse - Energetic materials assisted. Application for new fail-safe and fault-tolerant converters*, **Power Conversion Intelligent Motion conference**, PCIM Europe 2012, 8-10 May 2012, Nuremberg

[5] Zhifeng DOU, Frédéric RICHARDEAU, Emmanuel SARRAUTE, Vincent BLEY, Jean-Marc BLAQUIERE, Claire VELLA, Gilles GONTHIER, *PCB dual-switch fuse with energetic materials embedded. Application for new fail-safe and fault-tolerant converters*, **23<sup>rd</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis**, October 1- 5 2012, Cagliari, Italy + **REVUE ELSEVIER MICROELECTRONICS RELIABILITY**

#### ■ Publications liées au sous-projet FAULT-TOLERANT

[6] L. Pham, F. Richardeau, G. Gateau, M. Cousineau, H. Helali, F. Ituriz, *5-Level Double-Boost Type PFC with Fault-Tolerant Capability*, **13<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications Conference**, 8-10 September 2009, Barcelona, Spain

[7] L. Pham, F. Richardeau, G. Gateau, *Fault Diagnosis and PD-PWM Reconfiguration of a 5-Level Double-Boost PFC with Fault-Tolerant Capability*, **IEEE 36<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, IECON 2010, Glendale-Phoenix, USA, 7-10 novembre 2010

[8] L. Pham. F. Richardeau, G. Gateau, *Diagnosis Strategies and Reconfiguration of a 5-Level Double-Boost PFC with Fault-Tolerant Capability*, **20<sup>th</sup> IEEE International Symposium of Industrial Electronics**, ISIE 2010, Gdansk, Pologne, 27-30 June 2011

[9] L. Pham. F. Richardeau, G. Gateau, *Short Fail-Safe Capability and Fault Diagnosis Strategies Dedicated to a Reconfigurable 5-Level Double-Boost PFC*, **14<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications Conference**, EPE 2011, August 30-September 1<sup>st</sup>, Birmingham, UK

[10] F. Richardeau, L. Pham, *Reliability Calculation of Multilevel Converters – Theory and Applications*, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 8 mars 2012

[11] L. Pham. F. Richardeau. G. Gateau, *Diagnostic Strategies and Reconfiguration for a New Single-Phase 5-Level Double-Boost PFC Including Fail-Safe and Fault-Tolerant Capabilities*, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 8 mars 2011

#### ■ Thèses en relation avec le projet

[12] Zhifeng Dou, **LAPLACE N7**, soutenance le 4 novembre 2011

[13] Linh Pham, **LAPLACE N7**, soutenance le 9 novembre 2011

**Liste des brevets déposés :**

*NOUVELLES STRUCTURES DE REDONDANCE POUR CONVERTISSEURS STATIQUES*

Dépôt de brevet INP Toulouse, Université Toulouse Mirail, Université Montpellier II

Numéro de demande : 1055523

Numéro de soumission : 1000084136

Date de réception : 07 juillet 2010

Références SAIC INPT : BFF 10P0156/VCA

Demandeur : Institut National Polytechnique de Toulouse

Inventeurs: Frédéric Richardeau, Emmanuel Sarraute, Jean-Jacques Huselstein et Thierry Martiré

**Analyse succincte de la complétude de l'action :**

*Sources : Rapport final expert CASAREL*

Le projet CASAREL a répondu en grande partie à ses objectifs. D'une part, au laboratoire LAPLACE, deux thèses de très bon niveau ont permis d'évaluer de nombreuses solutions eu égard à la fiabilité : régime de défaut de semi-conducteurs, mise en œuvre de rupteurs et de structures aptes à fonctionner en régime de défauts. Il faut souligner la cohérence de l'ensemble impulsée par le responsable du projet. Le laboratoire IES a proposé des topologies de reconfiguration ainsi que des solutions originales de rupteurs à commande électrique dont la mise en œuvre s'est avérée délicate. En parallèle, la société SME a apporté un aspect novateur dans ce projet avec la conception de rupteurs pyrotechniques. Malgré les difficultés rencontrées, il faut persévérer dans cette voie prometteuse qui vient en complément des solutions électriques.

## Fiche Projet : EPAHT

**Appel à projet : N°5 – L'électronique de puissance dans les systèmes embarqués –**  
20 novembre 2007

**Acronyme du projet : EPAHT**

**Titre du projet : Etude du PAckaging de composants SiC pour électronique de puissance  
Haute Température**

**Nom et prénom du porteur de projet : Marie-Laure LOCATELLI – LAPLACE**

**Expert suiveur : Zoubir KHATIR – INRETS**

**Coût total du projet : 439 000 €**

**Montant du financement FRAE : 439 000 €**

**Durée : 36 + 12 = 48 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- Université Paul Sabatier Toulouse, INP Toulouse et UMR CNRS 5213  
Laboratoire PLAsma et Conversion d'Énergie (LAPLACE)
- Université Claude Bernard, Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon et UMR CNRS 5005  
Laboratoire AMPERE
- HISPANO-SUIZA

### Résumé du projet :

La disponibilité industrielle de transistors à effet de champ (JFET) et de diodes en carbure de silicium (SiC) permet d'étudier des convertisseurs de puissance fonctionnant à haute température ambiante (plus de 200°C) à destination notamment de l'industrie aéronautique. D'autres domaines d'applications comme le spatial, le forage et les applications militaires font état de besoin d'électronique fonctionnant avec des températures de jonctions de 300 à 600°C. Si les composants haute température existent, les moyens de les mettre en œuvre, ainsi que leur fiabilité à des températures élevées restent à définir.

Notre projet propose donc l'étude de faisabilité d'un module de puissance à base de composants SiC fonctionnant à des températures ambiantes supérieures à 200°C. Il se focalise principalement sur la puce et son environnement immédiat, en considérant les aspects fiabilité et vieillissement.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

#### ■ Revues internationales

[1] C. BUTTAY, C. RAYNAUD, H. MOREL, G. CIVRAC, M.L. LOCATELLI, F. MOREL, *Thermal stability of silicon-carbide power diodes*, **IEEE Transactions on Electron Devices**, vol. 59, N° 3, 2012 (March), pp. 761-769.

[2] M. BECHARA; R. KHAZAKA; S. DIAHAM; M.L. LOCATELLI, *Crystallization effect on the dielectric strength of fluorinated parylene at high temperature*, 2012, **European Journal of Electrical Engineering**, Vol. 15, No. 2-3, pp. 157-168.

[3] S. DIAHAM; M. BECHARA; M.L. LOCATELLI; Th. LEBEY, *Influence of crystallization-induced amorphous phase confinement on  $\alpha$ - and  $\beta$ -relaxation molecular mobility in parylene F*, 2012, **Journal of Applied Physics**, Vol. 110, 063703, (7pages).

[4] S. HASCOËT; C. BUTTAY; D. PLANSON; R. CHIRIAC; A. MASSON, *Pressureless Silver Sintering Die-Attach for SiC Power Devices*, **Materials Science Forum**, 2012, 740 -742, pp. 851-854

[5] S. DIAHAM; M. BECHARA,; M.L. LOCATELLI; C. TENAILLEAU, *Electrical conductivity of Parylene F at High Temperature*, 2011, **Journal of Electronic Materials**, Vol. 40, N°. 3, pp. 295-300

[6] M.L. LOCATELLI; S. DIAHAM; Z. VALDEZ-NAVA; M. BECHARA; R. KHAZAKA, *Suitable characterization method and insulating materials for devices operating above 200 °C*, 2011, **Advanced Materials Research**, Vol. 324, 229-232

[7] S. DIAHAM, M.L. LOCATELLI, Z. VALDEZ-NAVA, *Dielectrics for High Temperature SiC Device Insulation: Review of New Polymeric and Ceramic Materials*, *'Silicon Carbide Materials, Processing and Applications in Electronic Devices*, **Moumita Mukherjee (Ed.)**

#### ■ Conférences internationales

[8] M. BECHARA, S. DIAHAM, M.L. LOCATELLI, *Thickness Dependence of the Maxwell-Wagner-Sillars Dielectric Relaxation Dynamics in Semicrystalline Fluorinated Parylene*, 2011, **14<sup>th</sup> International Symposium on Electrets (ISE 14)**, August 28/31, Montpellier, FRANCE

[9] R. KHAZAKA, M. BECHARA, S. DIAHAM AND M.L. LOCATELLI, *Parameters Affecting the DC Breakdown Strength of Parylene F Thin Films*, 2011, **IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**, 16/19 oct., Cancun, MEXICO

[10] A. MASSON, C. BUTTAY, H. MOREL, C. RAYNAUD, S. HASCOËT, L. GREMILLARD, *High-temperature die-attaches for SiC power devices*, **EPE**, Aug 2011, Birmingham, United Kingdom, Article number 6020161

[11] C. BUTTAY, C. RAYNAUD, H. MOREL, M. LAZAR, G. CIVRAC, D. BERGOGNE, *High-temperature behavior of SiC power diodes*, **EPE**, Aug 2011, Birmingham, United Kingdom

[12] C. BUTTAY, A. MASSON, J. LI, M. Johnson, M. LAZAR, C. RAYNAUD, H. MOREL, *Die Attach of Power Devices Using Silver Sintering-Bonding Process Optimization and Characterization*, **IMAPS, High Temperature Electronics Network (HiTEN)**, Jul 2011, Oxford, United Kingdom

[13] C. BUTTAY, R. ROBUTEL, C. MARTIN, C. RAYNAUD, S. DAMPIENI, D. BERGOGNE, T. CHAILLOUX, *Effect of High Temperature Ageing on Active and Passive Power Devices*, **HiTEC 2010**, May 2010, Albuquerque, United States

[14] C. BUTTAY, C. RAYNAUD, H. MOREL, G. CIVRAC, M.-L. LOCATELLI, F. MOREL, *Thermal Requirements of SiC Power Devices*, **6th European Advanced Technology Workshop on Micropackaging and Thermal Management**, Feb 2011, La Rochelle, France.

#### ■ Conférences nationales

[15] A. MASSON; W. SABBAB; R. RIVA; C. BUTTAY; S. AZZOPARDI; H. MOREL; D. PLANSON; R. MEURET, *Report de puce par frittage d'argent - mise en œuvre et analyse*, **EPF'2012**, Jul 2012, Bordeaux, France

[16] R. KHAZAKA, S. DIAHAM, M.L. LOCATELLI, P. BIDAN, *Durabilité à haute température de films minces de polyimide pour l'isolation électrique dans les modules de puissance*, **EPF'2012**, Jul 2012, Bordeaux, France

#### ■ Thèses financées par le projet

[17] R. KHAZAKA, *Etude du vieillissement de polymères isolants utilisés dans le packaging des modules de puissance haute température*, PhD, **Université de Toulouse**, 29 novembre 2011

[18] A. MASSON, *Mise en œuvre de techniques d'attaches de puces alternatives aux brasures pour des applications haute température*, PhD, **Institut National des Sciences Appliquées de Lyon**, 2 février 2012

#### ■ Thèse ayant contribué au projet

[19] M. BECHARA, *Etude de matériaux isolants d'encapsulation pour la montée en température des modules de puissance haute tension*, PhD, **Université de Toulouse**, 10 novembre 2011

**Liste des brevets déposés :** néant

#### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert EPATH*

Les objectifs principaux du projet ont été atteints. Il s'agit de ceux liés aux définitions, réalisations et aux caractérisations des assemblages. Seuls ceux liés aux tests de vieillissement et modélisation des dégradations et de durées de vie ne l'ont pas été. Il est clair que les objectifs du projet étaient initialement trop ambitieux. Des solutions technologiques ont été proposées pour les assemblages de puissance pour des composants SiC et pour des applications hautes températures. Certaines solutions n'ont pu être évaluées et comparées à cause de difficultés de mises en œuvre techniques pour leur réalisation. Bien que des briques technologiques aient pu être réalisées et servir de démonstrateurs partiels, il aurait été intéressant d'aller jusqu'à la réalisation de l'assemblage démonstrateur complet défini par le projet. Seules des caractérisations et des tests de fiabilité sur un tel démonstrateur permettront de valider au final la solution technologique recherchée. Cependant, ces travaux sont tout de même menés en continuité par les partenaires dans le projet THOR.

## Fiche Projet : EPOPE

**Appel à projet : N°5 – L'électronique de puissance dans les systèmes embarqués –**  
20 novembre 2007

**Acronyme du projet : EPOPE**

**Titre du projet : Effects of Particles On Power Electronics**

**Nom et prénom du porteur de projet : Patrick AUSTIN – LAAS-CNRS**

**Expert suiveur : Hervé MOREL – INSA Lyon**

**Coût total du projet : 681 000 €**

**Montant du financement FRAE : 529 000 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- ASTRIUM Space Transportation
- AIRBUS FRANCE
- EADS France Innovation Works
- CNRS UMR 5214  
Institut d'Electronique du Sud (IES)
- CNRS UMR 5218  
Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS)

### Résumé du projet :

La disponibilité industrielle de transistors à effet de champ (JFET) et de diodes en carbure de silicium (SiC) permet d'étudier des convertisseurs de puissance fonctionnant à haute température ambiante (plus de 200°C) à destination notamment de l'industrie aéronautique. D'autres domaines d'applications comme le spatial, le forage et les applications militaires font état de besoin d'électronique fonctionnant avec des températures de jonctions de 300 à 600°C. Si les composants haute température existent, les moyens de les mettre en œuvre, ainsi que leur fiabilité à des températures élevées restent à définir.

Notre projet propose donc l'étude de faisabilité d'un module de puissance à base de composants SiC fonctionnant à des températures ambiantes supérieures à 200°C. Il se focalise principalement sur la puce et son environnement immédiat, en considérant les aspects fiabilité et vieillissement.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

#### ■ Publications écrites

[1] M. Zerarka, P. Austin, M. Bafleur, *Comparative study of sensitive volume and triggering criteria of SEB in 600V planar and trench IGBTs*, **Microelectronics Reliability**, Vol.51, N°9-11, pp.1990-1994, septembre 2011

[2] M. Zerarka, P. Austin, G. Toulon, F. Morancho, H. Arbess, J. Tasselli, *Behavioural study of single event burnout in power devices for natural radiation environment applications*, **IEEE Transactions on Electron Devices**, Vol.59, N°12, pp.3482-3488, décembre 2012 , N° 12621

## ■ Thèses en relation avec le projet

[3] Moustafa Zerarka, *Etude des régimes extrêmes de fonctionnement en environnement radiatif des composants de puissance en vue de leur durcissement pour les applications aéronautiques et spatiales*, LAAS-CNRS, Université de Toulouse, soutenance le 19 juillet 2013

[4] Moustafa Zerarka, «*Étude Contribution à l'étude de la fiabilité des technologies avancées en environnement radiatif atmosphérique et spatial par des méthodes optiques* », IMS Bordeaux, 16 décembre 2013

**Liste des brevets déposés :** néant

## **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert EPOPE*

Le déroulement du projet EPOPE a été semé d'embûches, principalement pour des difficultés de recrutement, ce qui est assez fréquent dans un projet de recherche. Cela a occasionné un retard et n'a pas permis de réaliser certaines tâches comme la réalisation de puces durcies. Toutefois les résultats obtenus sont significatifs et assez précurseurs. Si, comme c'est assez souvent le cas, le projet n'a atteint tous ces objectifs, les résultats produits dans les trois lots sont souvent précurseurs et serviront de référence à toute nouvelle étude sur le sujet.

## Fiche Projet : AMFORTAS

**Appel à projet : N°4 - Matériaux pour l'aéronautique et l'espace - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : AMFORTAS**

**Titre du projet : Alliages à Mémoire de FORMe pour Technologies Aéronautiques et Spatiales**

**Nom et prénom du porteur de projet : Philippe VERMAUT** – Métallurgie Structurale LPCS - Chimie ParisTech

**Expert suiveur : Michel Morin**

**Coût total du projet : 641 602 €**

**Montant du financement FRAE : 299 800 €**

**Durée : 36 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- DMSM-ONERA Châtillon
- LPMM Arts et Métiers ParisTech Metz
- ICMPE UMR-CNRS Thiais
- CEMES UPR-CNRS Toulouse

**Résumé du projet :**

Dans le domaine aéronautique, les objectifs de réduction des nuisances sonores et des émissions polluantes conduisent les motoristes à considérer avec de plus en plus d'attention le développement de systèmes « intelligents », capables de réguler les flux aérothermiques tout en fonctionnant à des niveaux de température élevés.

L'objectif de AMFORTAS est de développer des alliages à mémoire de forme réfractaires à haute température de transformation martensitique, constitutifs de dispositifs de régulation devant fonctionner à haute température.

Pour cela, les systèmes métalliques actuellement peu connus (RuTa, TiAu, et HfPd). L'objectif de ce projet est donc de sélectionner le meilleur candidat et d'optimiser ses performances par modification de la composition chimique (stoechiométrie, ajout d'un 3eme élément) et modification de la microstructure par traitement thermomécaniques.

La première moitié de ce projet a été dédiée à l'étude microstructurale des alliages ainsi qu'à l'évaluation quantitative de l'effet de mémoire de forme. Dans le système HfPd, très peu étudié jusqu'à présent, une transformation martensitique (dont le signal est visible sur la courbe de DSC ci-contre) à haute température est bien présente mais avec un hystérésis (écart entre les pics) très large (> 100°C) peu propice aux applications de régulation espérées. Par ailleurs, la mesure de l'effet mémoire de forme associé à cette transformation martensitique est trop faible (~0.6%) pour permettre une éventuelle application. En revanche, TiAu présente un hystérésis plus étroit (< 30°C) et un effet mémoire de forme bien supérieur. Les premières mesures effectuées sur un alliage non optimisé (microstructure de solidification) montrent que pour une déformation résiduelle de 5%, 3,9% sont récupérés au chauffage. De nouvelles expérimentations sont en cours pour connaître le comportement du matériau sur une plus large gamme de déformations. La modification de la composition chimique ou de nouveaux traitements thermiques nous permettrons certainement d'améliorer encore les performances de ce système.

Dans la seconde partie du projet, l'accent sera mis sur l'optimisation des propriétés de mémoire de forme, principalement dans TiAu, ainsi que sur l'évolution de ces performances dans le temps (vieillessement à Htes T° et fatigue). A cet effet, la modélisation du comportement micromécanique jouera un rôle primordial dans la prédiction des performances et nous aidera à mieux choisir les différentes expérimentations à venir.

#### **Ce projet a donné lieu à:**

- La soutenance de deux thèses (Charles Declairieux et Anne Manzoni)
- 7 articles dans des journaux internationaux à comité de lecture,
- 3 conférences invitées dans des congrès
- 3 communications orales dans des congrès,
- 4 communications par affiches dans des congrès
- 4 articles en cours de préparation

**Liste des brevets déposés :** néant

#### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final AMFORTAS*

Trois familles d'alliages susceptibles de présenter un effet mémoire à haute température ont été étudiées dans le cadre du projet AMFORTAS : HF-Pd, Ti-AU, Ru-Ta.

Même si les résultats de l'étude du système Hf-Pd sont assez décevants et qu'il ne sera pas possible d'utiliser cet alliage comme actionneur, un très gros travail d'investigation tout à fait original a été mené à bien. Les relations d'orientation entre l'austénite et la martensite ont été mesurées, et une hypothèse d'une réversion de la martensite en austénite par shuffle a été proposée.

L'étude du système Ti-Au est très poussée. Par microscopie électronique, deux modes de maillage, qui sont en accord avec les calculs géométriques, ont été trouvés. Les essais thermomécaniques réalisés sont aussi très complets. Même si cet alliage ne présente pas un effet mémoire complet important (1% de déformation), on doit pouvoir le retenir, sans doute avec un ajout de chrome pour le protéger de l'oxydation et abaisser légèrement les températures de transformation. Des études complémentaires seraient cependant nécessaires, pour vérifier par exemple la tenue de l'effet mémoire avec le nombre de cycles thermomécaniques.

L'étude des alliages base Ru-Ta est très complète et innovante. Elle permet une meilleure compréhension de ce type d'alliage qui a été peu étudié du fait des difficultés à réaliser des expériences à très haute température. Il semble que l'alliage Ru-Ta-Fe puisse être un bon candidat pour la fabrication d'actionneur AMF haute température. Reste là aussi à réaliser (entre autre) des cyclages thermomécaniques pour vérifier la stabilité de l'effet mémoire de forme avec le nombre de cycles.

Il s'en suit de nombreuses avancées scientifiques dans la compréhension de ces trois familles d'alliages à mémoire de forme haute température.

## Fiche Projet : CASSIS

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l'aéronautique et l'espace - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : CASSIS**

**Titre du projet : Composites Aéronautiques : Simulation et Système pour l'Investigation non destructive**

**Nom et prénom du porteur de projet : Frédéric REVERDY – Laboratoire Méthodes CND, CEA/LIST**

**Expert suiveur : Emmanuel LE CLEZIO- Professeur de l'Université de Montpellier 2**

**Coût total du projet : 693 200 €**

**Montant du financement FRAE : 449 900 €**

**Durée : 36 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- EADS IW
- IMASONIC
- LAUM
- LRM-UTC
- POEMS

**Résumé du projet :**

L'utilisation accrue des matériaux composites et leurs conditions d'utilisation spécifiques et exigeantes imposent un contrôle minutieux de leur état de santé. Par conséquent, un enjeu primordial de l'industrie aéronautique est la mise en œuvre de méthodes de contrôle non destructif (CND) performantes permettant le diagnostic de leur état de santé.

CASSIS a pour but de répondre à ce besoin par le développement d'outils de simulation et de capteurs ultrasonores afin d'améliorer la détection et la caractérisation des défauts.

Les outils de modélisation permettent de prédire la réponse ultrasonore de zones à faces non parallèles où d'anomalies de type ondulations de plis. Ces outils permettront à terme d'améliorer la conception de nouveaux capteurs adaptés au contrôle de matériaux composites.

**Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):**

Non communiquées

**Liste des brevets déposés :** néant

**Liste des logiciels réalisés :** néant

**Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final CASSIS expert et Rapport final CASSIS porteur de projet*

Le projet a été divisé en 5 lots concernant le développement d'outils de modélisation et de capteurs pour l'aéronautique et leur intégration au sein du logiciel de simulation CIVA développé par le CEA. La réalisation de capteurs associés au contrôle de composite constituait aussi une des ambitions

du projet.

Le lot 1 est terminé ; le livrable est un rapport portant le numéro de référence EADS 28313. Celui-ci est disponible sur le serveur ftp dédié au projet [ftp://cassis:Dc2sem\\$@ftp.cea.fr/Lot1](ftp://cassis:Dc2sem$@ftp.cea.fr/Lot1). La totalité du lot 2 a été faite. Les modèles ont été développés et connectés à la plateforme CIVA à l'aide d'un système de PlugIn. Une démonstration a été faite à l'expert et aux différents partenaires lors de la réunion de clôture du projet.

Une bonne partie du lot 3 a été accomplie. Une interface graphique a été développée dans la plateforme CIVA pour permettre à un utilisateur de définir des pièces composites à partir d'un profil dessiné à la main. Cette définition de pièces suit le formalisme habituel des avionneurs. L'utilisateur peut aussi positionner et ajuster les paramètres de défauts de type ondulations de plis. Le maillage ainsi que le code d'éléments finis ont été développés. La connexion à la plateforme CIVA n'a pas pu aboutir suite à un problème de ressources humaines. La partie maillage a été implémentée dans CIVA permettant à l'utilisateur de visualiser en temps réel l'orientation cristallographique du composite. Il manque quelques mois de travail pour finir l'intégration complète du code éléments finis.

Le lot 4 a été entièrement complété et un nouveau design de capteur ultrasonore non prévu initialement a été proposé. Un capteur de type « sparse », cad à distribution aléatoire des éléments a été conçu et réalisé. Des développements informatiques supplémentaires ont été effectués et implémentés dans la plateforme CIVA permettant à un utilisateur de définir ce type de capteur et/ou d'importer un capteur avec des types d'éléments différents.

Le lot 5 a été commencé avec une recette du capteur de type « sparse ». La maquette a été procurée.

Ces développements logiciels et matériels trouveront naturellement des applications pertinentes pour les industriels du domaine de l'aéronautique. EADS, en particulier, y voit déjà un outil très performant de simulation permettant l'optimisation des cycles de contrôle ou la réduction du coût de capteurs et dispositifs associés.

## Fiche Projet : CORTEC

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et l’Espace - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : CORTEC**

**Titre du projet : COMposites Résistants en Température Et aux Chocs**

**Nom et prénom du porteur de projet : Marie-Hélène RITTI – ONERA Chatillon**

**Expert suiveur : Michel DE GLINIASTY - ONERA**

**Coût total du projet : 535 000 €**

**Montant du financement FRAE : 300 000 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- CTMI
- PYROMERAL
- ENSAM/LIM Paris

### Résumé du projet :

Il existe un domaine de température situé entre 250 et 700°C pour lequel il n'existe pas de composites appropriés.

Afin de combler ce manque, l’ONERA propose un programme d’études CORTEC relevant successivement de la mise en œuvre, de la caractérisation et de la compréhension des mécanismes d'endommagement sur deux systèmes de composites: carbone/polymère thermostable et carbone/Pyromère.

Les renforts fibreux de carbone sont tissés et fournis par la société CTMI. Pour sa part, l'ONERA sélectionne les architectures fibreuses, met en œuvre les composites C/polymère thermostable par injection (RTM : Resin Transfer Moulding) d'une résine polyimide, et assure la réalisation des essais de caractérisation mécanique (traction, essais d'impact de type « Boeing ») ainsi que les investigations microstructurales. Les composites C/Pyromère sont élaborés par la société Pyromeral Systems en utilisant une technique « bas coût » de moulage sous poche à vide de plis de tissus pré-imprégnés. Les premiers travaux de l'ENSAM dont le rôle est d'étudier le vieillissement thermique sous air de la résine polyimide PETI 330, ont permis de dresser les bases d'un nouveau modèle cinétique de vieillissement thermique pour les polymères hydrocarbonés; ce modèle permet de simuler de manière satisfaisante les pertes de masse en atmosphère inerte (thermolyse) et oxydante (thermo-oxydation) de films minces de résine PETI-330 (1).

Les premières caractérisations à l’ambiante ont été réalisées sur certaines préformes de carbone associées aux deux matrices en traction monotone (contrainte et allongement à rupture, modules d'élasticité) et en impact type « Boeing » (basse vitesse et faible énergie) pour lequel on visualise l'état d'endommagement interne (résistance à l'impact).

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

Le modèle cinétique général de vieillissement thermique PETI mis en place par le laboratoire PIMM d'ARTS ET METIERS ParisTech a fait l'objet de plusieurs publications dans des conférences :

## ■ Conférences internationales

[1] COMATCOMP'09

[2] ECCM'14

## ■ Conférences nationales

[21] JNC17

**Liste des brevets déposés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert CORTEC*

Au cours du projet, 2 types de résines ont été étudiées : une résine minérale produite par Pyroméral, la pyromère, et une matrice organique mise en œuvre par l'ONERA, la PETI-330. Avec ces résines, 4 types de renforts avec des fibres de carbone haute résistance ont été testés, un UD, 2 types de 2D et un 2.5D. Et parallèlement un renfort de fibres de carbone haut module (PyroKarb) a été testé avec la résine pyromère. Pratiquement plus de 200 éprouvettes ont été réalisées et testées, sous sollicitation mécanique (traction, flexion ou impact) ou d'environnement (vieillessement thermique).

Pour la partie tenue mécanique, l'ONERA conclue que l'effet du type de renforts est assez faible sur la tenue mécanique, et beaucoup moins important que l'effet résine, avec une résine minérale plus fragile, particulièrement sous sollicitations de flexion (CIL). Le vieillissement à chaud renforce encore la différence entre ces 2 résines avec une dégradation supérieure de la résine minérale. Dans tous les cas la matrice minérale est bien meilleure quand elle est associée aux fibres haut module.

Ce projet a permis à l'ENSAM d'étudier et de mettre au point un modèle cinétique du vieillissement thermique de la résine PETI-330. Ce modèle devrait permettre à terme de prévoir le vieillissement de pièces aéronautiques travaillant à chaud avec ce type de résine.

L'implication de CTMI a consisté à fournir les tissus et les préformes sèches et celle de Pyromal à fournir et mettre en œuvre la résine pyromère, les composites PyroKarb, ainsi qu'en la réalisation d'essais mécaniques et de vieillissement thermique.

En conclusion d'un point de vue technique les conclusions du projet sont intéressantes et pertinentes en vue de l'utilisation de ces types de résine et renfort dans le domaine de l'aéronautique. Un grand nombre d'éprouvette a été réalisé et un grand nombre d'essais a été mené. Je suis néanmoins surpris de ne pas voir apparaître de valeur de taux de restitution d'énergie pour ces 2 résines comme il avait été annoncé par l'ONERA sur le planning prévisionnel de 2009.

## **Fiche Projet : CURACO (abandonné)**

**Appel à projet : N°7 - Maîtrise de l'environnement thermique - 12 décembre 2008**

**Acronyme du projet : CURACO**

**Titre du projet : Cuisson Rapide des Composites Carbone Epoxy par Ondes Haute Fréquence**

**Nom et prénom du porteur de projet : – ONERA**

**Expert suiveur :**

**Coût total du projet :**

**Montant du financement FRAE :**

**Durée : 36 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- GEM
- ICAM
- LTN
- M.E.S. Technologies

**Résumé du projet :**

Les industriels du secteur aéronautique s'intéressent aux procédés de mise en œuvre de composites permettant d'atteindre des rampes de montée (et descente) en température de l'ordre de 10 à 30°C en lieu et place des 2-5°C/min généralement préconisées et appliquées dans les procédés aujourd'hui quotidiennement utilisés (autoclave, infusion, RTM, ...). En dehors des temps de cycles réduits qui ne sont pas toujours au centre de la problématique des industriels de ce secteur, l'influence de ces procédés sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des composites à résines thermodurcissables produits par ce biais reste aujourd'hui à évaluer. Dans ce cadre, il nous semble intéressant d'étudier des technologies de cuisson permettant d'appliquer un flux de chaleur volumique et non surfacique comme c'est généralement le cas (conduction et ou convection de surface). Ainsi, nous nous proposons d'étudier (et optimiser) l'influence d'un cycle de polymérisation rapide par micro-ondes ou HF de composites aéronautiques sur leurs propriétés finales.

**PROJET ABANDONNE EN JUILLET 2012**

# Fiche Projet : MASAE

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et le Spatial - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : MASAE**

**Titre du projet : Maîtrise de la Santé des Aerostructures soudées par friction-malaxage**

**Nom et prénom du porteur de projet : Anne LARUE DENQUIN - ONERA**

**Expert suiveur : Michel SUERY – Grenoble INP**

**Coût total du projet : 861 700 €**

**Montant du financement FRAE : 400 000 €**

**Durée : 36 mois**

## Noms des partenaires du projet et organismes :

- CEA LIST
- ARMINES - ENSMP
- EADS Innovation Works France

## Résumé du projet :

Le soudage par « Friction Stir Welding » (FSW), utilisant la voie solide, a démontré la soudabilité d’alliages de très haute résistance réputés non soudables par les technologies de soudage conventionnel.

Les soudures FSW se caractérisent par l’absence de défauts de solidification et de bonnes propriétés en statique et en fatigue. Cette technologie présente donc un très fort potentiel pour le remplacement du rivetage des jonctions de panneaux métalliques.

L’objectif général de MASAE est de développer une approche globale d’assurance qualité nécessaire à l’industrialisation de la technologie de soudage par friction-malaxage (ou friction stir welding - FSW) sur avions.

MASAE porte plus particulièrement sur l’influence des discontinuités de la matière (en particulier du type « résidu de plan de joint ») – dont la nocivité dépend des conditions de mise en oeuvre du procédé - sur la santé de l’assemblage.

Le projet comprend les trois aspects suivants:

- (1) l’analyse des origines physiques de la formation de ces discontinuités et des conditions de soudage associées,
- (2) le développement de moyens de contrôle non destructifs adaptés à ces hétérogénéités spécifiques,
- (3) la détermination de leur nocivité sur la résistance résiduelle et les mécanismes d’amorçage en fatigue.

Les retombées scientifiques attendues sont nombreuses :

- Optimisation de la technologie FSW par l’expression d’un domaine de mise en oeuvre permettant une sûreté maximale,
- Fourniture de techniques d’investigation non destructives avec prototypes calibrés,
- Développement d’une méthodologie de caractérisation mécanique de structures hétérogènes, couplant approche calcul et expérimentale,
- Développement d’outils de simulation adaptés pour des services de production ou de recherche et développement, permettant la prédiction de la tenue mécanique d’un assemblage pouvant comporter des défauts associés au procédé FSW.
- Développement de capteurs adaptés aux soudures FSW.

## Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

### ■ Conférences, journées "Poster"

[1] Le Jolu T., Morgeneyer T., Gourgues A.-F., "Effect of joint line remnant on fatigue lifetime of al-Cu-Li alloy (2198) similar friction stir welds", poster présenté aux journées **MECAMAT, Aussopis**, Janvier 2010.

[2] Le Jolu T., Morgeneyer T., Gourgues A.-F., "effect of defects on fatigue lifetime of friction-stir welded Al-Cu-Li alloy", **proceedings ECF18**, Septembre 2010.

### ■ Journaux

[3] Le Jolu T., Morgeneyer T., Gourgues A.-F., " Effect of joint line remnant on fatigue lifetime of friction-stir welded al-Cu-Li alloy ", **Science and technology of welding and joining**, Vol15, N°8, pp 694-698.

### ■ Thèses

[4] Le Jolu T., Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris, Octobre 2008

### ■ Rapports Techniques

[5] Rapport technique spécification des capteurs prototypes, CEA, Février 2012

[6] Rapport technique synthèse des essais expérimentaux, CEA, Février 2012

[7] Rapport de caractérisation des soudures saines, ARMINES, Janvier 2010

[8] Le Jolu T., Rapport de caractérisations des soudures défectueuses, ARMINES, Décembre 2011

[9] Le Jolu T., Rapport des résultats de la simulation E. F., Décembre 2011

D'autres communications sont prévues, notamment sur la caractérisation et les conditions de formation des défauts de soudage FSW, lors de conférences dédiées au procédé.

**Liste des brevets déposés :** néant

## Analyse succincte de la complétude de l'action

*Sources : Rapport final MASAE*

Le projet MASAE a réuni des laboratoires très compétents pour traiter le problème de la nocivité des défauts dans les joints soudés par friction-malaxage : l'ONERA pour la réalisation de soudures saines et défectueuses contrôlées, le CEA-LIST pour la caractérisation des défauts issus de l'opération de soudage, ARMINES pour l'influence des défauts sur les propriétés des soudures notamment les propriétés en fatigue et EADS Innovation Works pour le support industriel.

Le projet étant à caractère expérimental, son démarrage a été conditionné par la fourniture des matériaux nécessaires à la réalisation des essais. Il a ainsi démarré avec 5 mois de retard environ. Une prolongation de 6 mois a alors été demandée et accordée ce qui a permis de finaliser les travaux

prévus, en particulier la thèse réalisée au Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris qui avait démarré en Octobre 2008. Il faut noter qu'un projet de recherche impliquant un thésard ne peut en général pas être terminé en 36 mois car l'embauche du thésard ne coïncide que très rarement avec le début du projet.

Les travaux de recherche ont été menés en très bonne concertation entre les partenaires ce qui a permis d'aboutir à des résultats qui sont importants pour l'industriel partenaire du projet.

## Fiche Projet : MOSAIQUE

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et l’Espace – 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : MOSAIQUE**

**Titre du projet : Mise en Œuvre par fabrication laser de matériaux et architectures avancées pour l’aéronautique**

**Nom et prénom du porteur de projet : Marc THOMAS – ONERA**

**Expert suiveur : Jean-François FROMENTIN - SNECMA**

**Coût total du projet :**

**Montant du financement FRAE : 350 000 €**

**Durée : 30 mois**

**Noms des partenaires du projet et organismes :**

- ARMINES
- ENISE
- GERALP
- LIM
- Poly-Shape

**Résumé du projet :**

Notre objectif est d’explorer différents procédés innovants de fabrication laser (projection et frittage laser) qui constituent une alternative intéressante en termes de coût et de flexibilité par rapport aux procédés conventionnels et qui pourraient à terme permettre de réaliser des architectures complexes optimisées pour des applications multifonctionnelles à partir de plusieurs matériaux utilisés ou en voie d’introduction dans l’aéronautique (Nimonic C263, TiAl).

Cet objectif « ambitieux » nécessite au préalable de segmenter la recherche,

- d’une part dans le domaine de l’obtention de matériaux massifs,
- d’autre part dans le domaine de la fabrication d’architectures complexes, ce qui constitue le but de ce projet.

Le développement vers un stade industriel de nouvelles technologies de fabrication rapide de pièces métalliques ou intermétalliques « bonne matière » présente pour les industriels de l’aéronautique et de l’espace des avancées technologiques et économiques certaines :

- en termes de réduction des coûts (par l’absence d’outillage),
- de délais de réalisation de pièces mécaniques de petites séries et de prototypes (pour des études aérodynamiques),
- de conceptions nouvelles de pièces (nouveau « design », fonctionnalités nouvelles),
- d’allègement de structures (matériaux architecturés multifonctionnels),
- et d’amélioration des propriétés mécaniques.

C’est à ce titre que les procédés laser sont très prometteurs pour fabriquer en particulier les composants aéronautiques pour lesquels on ne connaît pas, aujourd’hui, de procédé d’élaboration adapté.

Le fait de travailler actuellement sur un matériau avancé (TiAl) sensible à la fissuration et avide d’oxygène permet de faire évoluer les techniques (préchauffage, atmosphère) pour mieux surmonter les modifications chimiques et structurales qui sont induites par les traitements couche par couche et l’environnement de travail, et ainsi maîtriser la fabrication rapide d’un plus grand nombre de matériaux.

Des résultats prometteurs ont ainsi été obtenus avec ce matériau TiAl par projection laser, avec des propriétés mécaniques supérieures à celles obtenues par la voie classique de fonderie.

Une publication a été réalisée pour le congrès THERMEC’2009 à Berlin.

## Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

Liste des brevets déposés : néant

Liste des logiciels réalisés : néant

## Analyse succincte de la complétude de l'action

Sources : *Rapport final MOSAIQUE*

Le rapport final synthétisant les activités du projet MOSAIQUE est riche en termes de résultats techniques couvrant les aspects matériaux et procédés et particulièrement intéressant car outre les nuances de matériaux aéronautiques étudiées, issues de 3 familles métallurgiques très différentes, un effort a également été porté sur la connaissance de la matière première (les poudres, indispensables à ces technologies) et sur les différents moyens capables de fabrication additive autant dans le domaine SLM que LMD.

On retiendra particulièrement que pour les matériaux analysés, il a été identifié:

- autant des limites technologiques: difficultés de fabriquer l'alliage intermétallique TiAl métallurgiquement sain par SLM, composition de la matrice acier pour le matériau CMM inappropriée à un taux de renforcement par TiC optimisé, ...,
- que des orientations à privilégier: gamme de conditions opératoires préconisées pour limiter le taux de défauts présents dans le Nimonic 263, traitements thermiques post-fabrication additive pour optimiser les propriétés des matériaux en fonction du besoin d'utilisation pour le Nimonic 263 ou le TiAl, proposition d'adaptation amont de la composition chimique de la poudre TiAl pour limiter son caractère fragile, ...,
- ainsi que des voies d'optimisation mises en œuvre et démontrées comme l'ajout d'un moyen de chauffage annexe, pour la fabrication de TiAl par LMD, qui permet de limiter les contraintes résiduelles liées aux gradients thermiques et assurer au matériau une santé métallurgique satisfaisante.

Il est également appréciable de voir que certains résultats obtenus sur échantillons métallurgiques de taille réduite ont été évalués sur des géométries dotées d'un caractère plus complexe tel que des structures architecturées pour le Nimonic 263 ou des évolutions de forme pour le matériau CMM. Même si l'attente industrielle souhaiterait de systématiser cette approche voire de l'accentuer en s'engageant sur un transfert d'échelle plus remarquable pour être capable d'apprécier au plus tôt les conséquences

# Fiche Projet : OPTIMIST

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et l’Espace - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : OPTIMIST**

**Titre du projet : Modélisation et OPTimisation de la MISE en Forme des Alliages de Titane**

**Nom et prénom du porteur de projet : Brigitte BACROIX– IMFT Toulouse**

**Expert suiveur : J. CREPIN- Maître de Recherche, Mines de Paris**

**Coût total du projet : 1 437 000 €**

**Montant du financement FRAE : 450 000 €**

**Durée : 36 mois**

## **Noms des partenaires du projet et organismes :**

- LETAM
- SYMME
- CEMEF
- EADS

## **Résumé du projet :**

L’optimisation des procédés de mise en forme à froid des alliages de titane demeure complexe à réaliser en raison de leur forte anisotropie. Avant d’utiliser un nouvel alliage, les industriels doivent donc s’appuyer sur un grand nombre d’essais qui sont de plus en plus remplacés par la simulation numérique afin de minimiser les coûts de mise au point.

Or, actuellement, les modèles de comportement introduits dans les outils numériques sont trop simples pour rendre compte du développement de la forte anisotropie de matériaux à structure hexagonale se déformant par glissement et maclage.

OPTIMIST vise donc l’amélioration de la description du comportement de ces matériaux dans les codes de simulation d’opérations de mise en forme ; des lois de comportement phénoménologiques seront ainsi identifiées sur des données issues à la fois d’essais mécaniques et de modèles micromécaniques prenant en compte les mécanismes actifs à l’échelle des grains (glissement et maclage).

Ce projet s’articule en 5 parties :

- (a) caractérisation du comportement mécanique lors de trajets de chargement complexes sur matériaux industriels,
- (b) identification des mécanismes de déformation à l’échelle microscopique sur matériaux modèles (A),
- (c) modélisation micromécanique du comportement (description des interactions glissement / maclage notamment et homogénéisation) et modélisation phénoménologique,
- (d) identification des lois de comportement (B) et,
- (e) validation par des simulations éléments finis d’opérations de mise en forme (C)

Au final, une meilleure compréhension des liens microstructures / propriétés permettra

- l’optimisation des gammes de laminage en partenariat avec les fournisseurs matière,
- la mise en place de procédures d’identification optimisées à partir d’essais complexes éventuellement hétérogènes pourra conduire les industriels à redéfinir leur stratégie de caractérisation expérimentale nécessaire à la qualification de nouveaux alliages,
- enfin, l’utilisation d’outils numériques plus fiables permettra de réduire les coûts de mise en forme et d’améliorer la conception de nouvelles pièces.

## Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

### ■ Thèses soutenues

[1] Benoît REVIL-BAUDARD, « Simulation du comportement mécanique des alliages de titane pour les procédés de mise en forme à froid de produits plats », Thèse de Doctorat en Mécanique Numérique, Mines-ParisTech, soutenue le 6 juillet 2010.

[2] Lei BAO, « Contribution to the Study of Deformation Twinning in Titanium », these de doctorat en Mécanique des Matériaux de l'Université Paul Verlaine-Metz, soutenue le 21 Juin 2011 à Pékin.

[3] Najoua BENMHENNI, « Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des alliages de Titane polycristallins », thèse en Mécanique et Matériaux, Université Paris13, soutenance prévue le 3 juillet 2012.

### ■ Publications

[4] L. Bao, C. Schuman, J.S. Lecomte, M.J. Philippe, X.A. Zhao, L.A. Zuo, C. Esling, "A Study of Twin Variants Selection and Twin Growth in Titanium", **Advanced Engineering Materials**, 13, pp. 928-932, 2011.

[5] C Schuman, L Bao, J.S Lecomte, Y. Zhang, J.M. Raulot, C. Esling, M.J. Philippe, "A New Variant Selection Criterion for Twin variants in Titanium alloys (part1)", **Advanced Engineering Materials**, 13, pp. 1114–1121, 2011.

[6] A Chattopadhyay, L. Bao, J.S Lecomte, Y Zhang, C Schuman, M.J Philippe , C Esling, "Role of Glide Systems in the Channel Die Compression of Commercially Pure Titanium Alloy", accepted in **Materials Science and Technology**, 2011.

[7] Yudong Zhang, Shiyong Wang, Claude Esling, Jean-Sebastien Lecomte, Christophe Schuman, Xiang Zhao and Liang Zuo, "Calculation method to identify dislocations in a known crystal structure by TEM", **Journal of Applied Crystallography**, 44, pp. 1164-1168, 2011.

[8] S. Bouvier, N. Benmhenni, W. Tirry, F. Gregori, M.E. Nixon, O. Cazacu, "Hardening in relation with microstructure evolution of high purity -titanium deformed under monotonic and cyclic simple shear loadings at room temperature", **Science and Engineering A**, 535, pp. 12-21, 2012.

[9] L. Tabourot, P. Balland, J. Raujol-Veille, M. Vautrot, C. Depres, F. Toussaint, "Compartmentalized model for the mechanical behavior of titanium", à paraître dans **Transtech Proc. ESAFORM2012**.

[10] T. Richeton, C. Schuman, J.S. Lecomte, L. Bao , C. Fressengeas, "Relation between twin and slip in parent lattice due to kinematic compatibility at interfaces", **Int. J Solids and Structures**, 49, pp. 1355-1364, 2012.

[11] S. Wang , C. Schuman, L. Bao, J S Lecomte, Y Zhang, J M Raulot, M.J. Philippe, X. Zhao, C Esling, "Variant Selection Criterion for Twin Variants in Titanium alloys deformed by rolling", **Acta Materialia**, 60, pp. 3912-3919, 2012.

[12] C Schuman, L Bao, J.S Lecomte, Y. Zhang, J.M. Raulot, C. Esling, M.J. Philippe, "A New Variant Selection Criterion for Twin variants in Titanium alloys (part2)", submitted to **Advanced Engineering Materials**, Oct. 2011.

[13] N. Benmhenni, B. Bacroix, S. Bouvier, R. Brenner, and T. Chauveau, "Micromechanical modelling of monotonic loading of Cp  $\alpha$ -Ti: Correlation between macro and micro mechanical behaviour", submitted to **Int. J. Plasticity**, Janv. 2012.

#### ■ Conférences avec actes

[11] B. Revil-Baudard, E. Massoni, "Implementation of an evolving non quadratic anisotropic behaviour for the closed packed materials", Proc. Numiform2010, 10th Int. Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, Pohang, South Korea, 13-17 June 2010, F. Barlat (ed.), American Institute of Physics (2010), pp. 228-234.

[12] Déprés C., Manole C., Balland P., Degré F., Pouzols V. and Tabourot L., "Stress Distribution and Plasticity" in "Plasticity of Crystalline Materials: From Dislocations to Continuum" edited by Edited by Ionescu I., Franciosi P., Bouvier s. and Cazacu O., June 2011. ISBN 978-1-84821-278-7.

[13] C. Schuman , L. Bao, J.S. Lecomte, M.J. Philippe , Y. Zhang , X. Zhao , L. Zuo , J.M. Raulot and C.Esling., "Model for twin-variant selection in Titanium Alloys", Proc. Ti – 2011, Beijing, July 2011.

[14] L. Bao, C. Schuman, J.S. Lecomte, M.J. Philippe, X.A. Zhao, L.A. Zuo, C. Esling, "Comparison of twin with multiple variants systems and twins with predominant twin system by ebsd measurements on split sample", Proc. Ti – 2011, Beijing, July 2011.

[15] N. Benmhenni, B. Bacroix, S. Bouvier, R. Brenner, T. Chauveau, "Hardening behavior in pure titanium sheet: experimental study and micromechanical modelling", Proc. Ti – 2011, Beijing, July 2011.

[16] C. Schuman , L. Bao, J.S. Lecomte, M.J. Philippe , Y. Zhang , X. Zhao , L. Zuo , J.M. Raulot and C. Esling, "New model for twin variant selection in hexagonal alloys", Proc. ICOTOM 16, Bombay, December 2011.

[17] N. Benmhenni, S. Bouvier, B. Bacroix, R. Brenner and H. Haddadi, "Mechanical characterisation and modelling the anisotropic behaviour of commercial purity  $\alpha$ -Ti. Material parameter identification using micromechanical model and experimental data", Proc. COTUME'2012, Deuxième Congrès Tunisien de Mécanique, Sousse, Mars 2012.

[18] P. Balland, C. Déprés, R. Billard, and L. Tabourot "Physically Based Kinematic Hardening Modelling of Single Crystal" THE 14th Int. ESAFORM Conference on Material Forming, 27–29 April 2011, Belfast (UK), AIP Conf. Proc. 1353, pp. 91-96.

#### ■ Conférences et séminaires sans acte

[19] N. Ben Mhenni, S. Bouvier, F. Gregori, T. Chauveau, O. Cazacu, « Caractérisation multiéchelle du titane haute pureté (HP, Ti- $\alpha$ ) en cisaillement simple », Colloque National MECAMAT- Ecole de Mécanique des Matériaux : Nouvelles approches en mécanique expérimentale, 11 - 15 janvier 2010, Aussois, France.

[20] N. Zontsika, « Calcul et développement d'outils de tracés de surfaces de plasticité à partir de codes de calculs polycristallins », soutenance de Master Physique et Applications, Spécialité Mécanique et Physique des matériaux, Université Paris13,

Juillet 2010.

[21] B. Bacroix, N. Benmhenni, S. Bouvier, R. Brenner, H. Haddadi, L. Bao, J.S. Lecomte, C. Schuman, A. Chattopadhyay, L. Tabourot, C. Déprés, C. Manole, F. Toussaint, T. Pottier, E. Massoni, B. Revil, J. Delfosse, « *Modélisation et OPTimisation de la MISE en Forme des Alliages de Titane* », Journées Titane, Nantes, mai 2010.

[22] B. Bacroix, N. Benmhenni, S. Bouvier, R. Brenner, H. Haddadi, J.S. Lecomte, C. Schuman, L. Tabourot, C., E. Massoni, J. Delfosse, « *Modélisation et OPTimisation de la MISE en Forme des Alliages de Titane* », Journées Titane, mai 2011.

[23] N. Benmhenni, R. Brenner, S. Bouvier, H. Haddadi and B. Bacroix, "*Mechanical characterisation of commercially pure alpha-Ti and identification of macroscopic models via micromechanical modelling and experimental data*", Colloque Plasticité 2012, Metz, avril 2012.

[24] B. Bacroix, R. Benner, S. Bouvier, J. Delfosse, C. Déprés, C. Esling, H. Haddadi, J.S. Lecomte, E. Massoni, M.J. Philippe, C. Schuman, L. Tabourot, F. Toussaint, "*Modélisation et optimisation de la mise en forme des alliages d'aluminium*", Colloque Plasticité 2012, Metz, avril 2012.

[25] E. Massoni, « *Modélisation du comportement du titane au cours de procédés de formage à froid* », Journées technologiques Titane, mai 2012.

[26] S. Bouvier, N. Benmhenni, H. Haddadi, R. Brenner et B. Bacroix, « *Identification de lois de comportement macroscopique pour la mise en forme du titane* », Journées technologiques Titane, mai 2012.

[27] C. Schuman, J.C. Lecomte, M.J. Philippe, « *Observation des mécanismes de déformation dans le titane à l'échelle du MET* », Journées technologiques Titane, mai 2012.

**Liste des brevets déposés :** néant

**Liste des logiciels réalisés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final OPTIMIST*

Le projet a débuté en Octobre 2008 pour une durée initiale de 36 mois prolongée de 19 mois.

Les objectifs ambitieux fixés dans la proposition ont été en grande partie atteints. En effet l'un des deux matériaux envisagés pour l'étude s'est révélé inadapté pour les opérations de mise en forme. Par contre le matériau Ti40 an, quand à lui, été étudié de façon exhaustive, tant du point de vue de sa microstructure, des mécanismes de déformation mis en œuvre au cours d'une grande variété d'essais mécaniques que de l'identification de modèles de comportement que ce soit par la voie macroscopique basée sur des modèles phénoménologiques que par la voie de la micromécanique, basée sur la prise en compte de données microstructurales et des mécanismes activés. La complémentarité des échelles d'observation et de simulation sont au cœur de la richesse de cette étude. Pour ce faire, il a fallu de nombreux échanges entre les différents acteurs du projet, ce qui semble au vu des résultats obtenus indéniables.

Ce projet s'est appuyé sur les compétences reconnues des différents partenaires, qui sont du meilleur niveau international. Que ce soit vis-à-vis des outils de caractérisations utilisés que des

moyens d'essais ou des simulations réalisées.

Ce travail a abouti à la réalisation de trois thèses de doctorat soutenues dans les délais impartis au projet et à la valorisation d'un nombre significatif de résultats vers la communauté scientifique sous la forme d'articles (13) dans des revues internationales de renom ou de participation (19) à de nombreux congrès nationaux ou internationaux. Ces données chiffrées sont tout à fait éloquentes et sont le gage de la qualité du travail effectué.

## Fiche Projet : RUPSCEN

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et l’Espace - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : RUPSCEN**

**Titre du projet : Nouvelles démarches multi-échelles et robustes pour la prédiction des SCENarios de RUPTure**

**Nom et prénom du porteur de projet : Nicolas MOES – Ecole Centrale Nantes**

**Expert suiveur : Emmanuelle RIVIERE, Jean-Noël BRICOUT - CNES**

**Coût total du projet : 1 179 731, 80 €**

**Montant du financement FRAE : 450 000 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- ENS de Cachan (LMT)
- INSA de LYON (LAMCOS)
- ONERA

### Résumé du projet :

Les matériaux composites stratifiés à matrice organique (CMO) constitue un domaine à la fois nouveau et ancien. Ancien au sens où c’est dans les années 1960 que chercheurs et ingénieurs ont commencé à les étudier sérieusement et à exploiter leurs propriétés. Nouveau car aujourd’hui, le développement de nouveaux matériaux et procédés ainsi que de nouvelles applications s’accélère, tout particulièrement dans l’industrie aéronautique et spatiale.

Le programme RUPSCEN concerne une question centrale et majeure qui n’a toujours pas reçu de réponse satisfaisante : comment prédire progression de la rupture et ses scénarios, des structures composites stratifiées de l’aéronautique et du spatial.

Jusqu’à aujourd’hui, ce sont les essais qui ont été privilégiés et qui sont à la base du dimensionnement et de la conception.

Le but ultime serait d’aller vers le Virtual Testing, c’est-à-dire vers le remplacement à terme d’une partie des essais par des simulations jusqu’à rupture complète.

Dans cette optique, le projet RUPSCEN souhaite :

- mettre en place de nouvelles démarches robustes et multi-échelles pour prédire les scénarios de rupture des composites stratifiés à matrice organique (CMO),
- et lever le verrou scientifique majeur vers le Virtual Testing, c’est-à-dire, localiser les endommagements et les déformations, puis fissuration et rupture finale au niveau de la phase terminale.

En termes de retombées en simulation, une démarche multi-échelle adaptée sur le plan de la simulation sera ainsi définie, afin de prédire correctement la phase de localisation des endommagements et des déformations suivi de la phase de propagation des fissures dans le composite stratifié, jusqu’à la rupture finale, et ce pour des structure de taille importante par rapport à la taille des zones dégradées. Cette démarche permettra de faire le lien entre l’échelle micro et l’échelle de la structure dans son entier.

En termes de retombées techniques, des maquettes numériques intégrant les algorithmes obtenus seront mises à disposition pour des transferts vers des codes de calcul industriels

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

Se référer au site : [http://www.ftpa.ec-nantes.fr/user/moes/Documents\\_RUPSCEN](http://www.ftpa.ec-nantes.fr/user/moes/Documents_RUPSCEN)

- **Journaux internationaux à comité de lecture**

[1] N. Moes, "Arlequin method and domain decomposition solver for complex multiscale simulations with nonconforming interfaces", **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, en cours.

N.C

- **Conférences**

N.C

- **Thèses**

Ce projet a donné lieu à 4 thèses, réalisées par : J.Thouzeau, C. Le Mauff, F. Zang, M. Genet ainsi qu'à un post-doctorat : N. Tardif

**Liste des brevets déposés :** néant

**Liste des logiciels réalisés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final RUPSCEN*

En début de la première période du contrat, l'INSA (LAMCOS) et le GeM ont rencontré quelques problèmes dans la mise en place des équipes intervenant sur le projet et cela entraîne un retard des activités par rapport au prévisionnel et donc un décalage dans l'utilisation des budgets prévus. Ce décalage a été résorbé à la fin de la dernière période.

Les travaux réalisés durant le projet RUPSCEN tels que présentés lors de la réunion finale et dans les documents de synthèse qui nous ont été transmis, sont conformes aux prévisions et présentent dans des résultats concrets qui donnent bon espoir d'atteindre les objectifs donnés à l'étude. On peut considérer que les travaux menés dans le cadre du projet sont tout à fait satisfaisants et prometteurs. En revanche, afin d'être exhaustif dans la validation des outils et méthodes développés dans le cadre de ce projet, la mise à l'épreuve sur des cas industriels reste à faire.

# Fiche Projet : THERMONC

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et l’Espace - 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : THERMONC**

**Titre du projet : Nouvelle génération de drains THERMIques à architecture cONtrôlée avec Nanotubes et/ou nanofibres de Carbone**

**Nom et prénom du porteur de projet : HEINTZ Jean-Marc– ICMCB-CNRS, Université Bordeaux 1**

**Expert suiveur : Pierre Marie GEOFFROY - CNES**

**Coût total du projet : 657 500 €**

**Montant du financement FRAE : 300 000 €**

**Durée : 36 mois**

## Noms des partenaires du projet et organismes :

- Laboratoire d'Etudes Thermiques HispanoSuiza
- Centre Interdisciplinaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux (CIRIMAT)

## Résumé du projet :

Dans le domaine de l'électronique de puissance, la gestion thermique de l'intégration des puces en silicium au sein du système global constitue un problème clé. L'échauffement de la puce en silicium, typiquement jusqu'à 150°C, entraîne la génération de contraintes thermomécaniques dans les différentes couches du circuit imprimé. Les fabricants de modules considèrent aujourd'hui que, compte tenu des évolutions des dernières années en matière de fiabilité du silicium, ce problème de fatigue mécanique constitue désormais le problème majeur en matière de fiabilité des modules d'électronique de puissance. Le développement de matériaux composites multicouches à propriétés thermiques élevées (le drain thermique), constitués d'une matrice métallique (Cu ou Al) renforcée par du carbone fibreux (fibre, nano fibre (NFC) et nano tube (NTC)) doit permettre de répondre directement à la demande industrielle.

THERMONC a pour vocation d'améliorer l'efficacité thermique et la fiabilité des systèmes électroniques de puissance en proposant de nouveaux systèmes de dissipation de la chaleur. THERMONC a donc pour objectif de réaliser des ensembles circuit/drain répondant aux demandes de l'industrie électronique en particulier pour le domaine de l'aéronautique.

Résultats à mi-parcours :

Après avoir défini le cahier des charges des drains thermiques et des tests de fiabilités, la modélisation à l'échelle nanométrique des nanocomposites (NFC/Cu et NTC/Cu) et à l'échelle du système des propriétés thermiques (conductivité et dilatation) a été commencée. Le transfert de chaleur est calculé par la méthode de résolution des ordonnées discrètes dans une NFC en utilisant les paramètres de mobilité et des collisions des porteurs de charges dans les NFC. L'élaboration des nanocomposite NFC(NTC)/Cu puis des matériaux finaux NFC(NTC)/Cu est divisé en 2 tâches distinctes.

Dans une première tâche, une croissance insitu des NTC dans une matrice poreuse de cuivre est envisagée. Pour cela, les conditions de synthèse catalytique des NTC (optimisation de la nature, de la taille et de la dispersion des matériaux catalytiques ainsi que celle des traitements CCVD (H<sub>2</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) sont en cours d'optimisation.

Dans une deuxième tâche, 2 procédés chimiques en voie aqueuse sont en cours d'optimisation afin de déposer directement une gangue de cuivre autour de chaque NFC. Deux procédés, un premier dit « electroless » et un second axé sur la décomposition d'un sel métallique

sont en cours d'optimisation. Pour chacun de ces procédés les NFC sont traités chimiquement (bain acide) afin de greffer des fonctions oxygène sur leur surface.

**Ce projet a donné lieu à :**

- 2 publications dans des revues avec comité de lecture
- 2 conférences dans des congrès internationaux et nationaux
- 2 ouvrages ou participation importante à des ouvrages

Précisions non communiquées

**Liste des brevets déposés :** néant

**Liste des logiciels réalisés :** logiciel CO-MM

**Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final RUPSCEN*

Le projet a été bien géré tant sur le plan scientifique que sur les ressources humaines et financières. L'association de compétences différentes à travers les partenaires du projet a été particulièrement bénéfique et productive dans le projet THERMONC. De nombreux verrous technologiques semblent déjà levés, comme la dispersion des fibres dans la matrice de cuivre, l'obtention d'une bonne interface cuivre/nanotubes de carbone ou encore le report direct du circuit DBC sur le drain thermique. Les résultats obtenus sont très encourageants et prometteurs dans le cadre d'une exploitation industrielle pour le secteur de l'électronique de puissance.

Le projet montre également que certaines pistes méritent d'être poursuivies, à savoir:

- i) la simulation des propriétés thermiques du composite, en particulier les résistances thermiques des interfaces nanotubes/matrice de cuivre.
- ii) l'élaboration de composite cuivre/nanotubes de carbone par extrusion à chaud,
- iii) l'élaboration in-situ de composite cuivre/nanotubes de carbone

La production scientifique et le savoir-faire développé au cours du projet THERMONC sont très satisfaisants par rapport aux ressources allouées au projet (près de 300k€). Le projet a permis de mettre au point un prototype, comme annoncé dans les objectifs du projet, qui présente une architecture originale par rapport à l'état de l'art dans le domaine. Les performances du prototype élaboré, qui sont en cours d'évaluation sur des bancs « test » de vieillissement, semblent déjà prometteuses.

## Fiche Projet : SURVOL

**Appel à projet : N°3 – Autonomie des systèmes aéronautiques et spatiaux - 15 décembre 2006**

**Acronyme du projet : SURVOL**

**Titre du projet : Logiciel de Commande Embarqués: robustesse et sécurité**

**Nom et prénom du porteur de projet : Dominikus NOLL – Université Paul Sabatier**

**Expert suiveur : Germain GARCIA – LAAS Toulouse**

**Coût total du projet : 574 000 €**

**Montant du financement FRAE : 298 000 €**

**Durée : 36 mois**

### **Noms des partenaires du projet et organismes :**

- Ecole Normale Supérieure (ENS) de Paris

### **Résumé du projet :**

SURVOL se développera le long de deux axes de recherche,

- la synthèse de lois de commande pour des systèmes aéronautiques prenant en compte des erreurs de modèle (robustesse) ou des fonctionnements dégradés (fiabilité),
- et la vérification algorithmique de codes informatiques embarqués sur les systèmes.

Ainsi, il s'agit d'améliorer la sûreté de fonctionnement du système à 2 niveaux.

L'intérêt commun de ces deux axes est qu'ils conduisent à des problèmes difficiles de l'optimisation nonlinéaire de type non lisse (non-différentiable) ou à des inégalités matricielles non linéaires.

Des algorithmes spécifiques de cette classe stratégique de problèmes seront développés ; facilitant ainsi la tâche de l'ingénieur tant au niveau de la conception de commandes que de la vérification de codes embarqués.

Au niveau d'une valorisation académique, les résultats issus du projet SURVOL seront publiés dans les grandes revues internationales des mathématiques appliquées, de l'automatique et de l'informatique

(SICOPT et SIOPT, Numerische Mathematik, IEEE TAC, Automatica, System and Control Letters).

Les acquis seront également présentés dans les grandes conférences internationales dans nos domaines. Et il sera mis à la disposition de la communauté de recherche internationale, des logiciels prototypes dans le domaine de l'optimisation, de l'automatique et de la vérification algorithmique de codes.

Au niveau industriel, il est envisagé la création de logiciels informatiques qui pourront naturellement être valorisés avec l'intermédiaire des organismes de tutelles et avec le soutien de partenaires industriels. Il est tout à fait dans l'optique de ce projet de rendre nos techniques accessibles aux utilisateurs industriels.

### **Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):**

- **Journaux**

[ ] L. Hosseini-Ravanbod, D. Noll, P. Apkarian. « *Structured  $H^\infty$  control and the price of Robustness* ». Soumis 2010.

- [2] P. Apkarian, L. Hosseini-Ravanbod, D. Noll. "Time domain constrained structured  $H^\infty$  Synthesis". **International Journal of Robust and Nonlinear Control**, vol. 21, no. 2, 2011, pp. 197-217.
- [3] D. Alazard, P. Apkarian, D. Noll, A. Simoes. "Lateral flight control design for a highly flexible aircraft using nonsmooth optimization". **Aerospace Science and Technology**, accepté en 2010.
- [4] P. Apkarian, D. Noll, A. Simoes. "Time domain control design: a nonsmooth approach". **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol. 17, no. 6, 2009, pp. 1439-1445.
- [5] M. Diehl, K. Mombaur, D. Noll. « Stability optimization of hybrid periodic systems via a smooth criterion ». **IEEE Transactions on Automatic Control**, vol. 54, no. 8, 2009, pp. 1881-1886.
- [6] L. Hosseini-Ravanbod, D. Noll, P. Apkarian. "Robustness via structured  $H^\infty/H^\infty$  Synthesis". Soumis 2010.
- [7] P. Apkarian. "Nonsmooth  $\mu$ -synthesis". **International Journal of Robust and Nonlinear Control**. Accepté 2010.
- [8] L. Hosseini-Ravanbod, D. Noll. "Gain-scheduling decentralized PID for imbalance compensation of a magnetic bearing". Soumis 2010.
- [9] B. Lienhardt, E. Hugues, D. Noll, C. Bès. "Failure-finding frequency for a repairable systems subject to hidden failures". **American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal of Aircraft**, vol. 45, no. 5, 2008, pp. 1804-1809.
- [10] A. M. Simoes, P. Apkarian, D. Noll. "Nonsmooth multi-objective synthesis with Applications". **Control Engineering Practice**, vol. 17, no. 11, 2009, pp. 1338-1348.
- [11] P. Apkarian, D. Noll, A. Simoes. "A nonsmooth progress function algorithm for frequency shaping control design". **IET Control Theory & Applications**, vol. 2, no. 4, 2008, pp. 323-336.
- [12] P. Apkarian, V. Bompard, D. Noll. "Control design in the time and frequency domain using nonsmooth techniques". **Systems and Control Letters**, vol. 57, no. 3, 2008, pp. 271-282.
- [13] D. Noll. "Bundle method for non-convex minimization with inexact subgradient and function values ». Soumis 2010.
- [14] D. Noll. « Cutting plane oracles to minimize nonsmooth and nonconvex functions". **Journal of Set-Valued and Variational Analysis**, vol. 18, no. 3-4, 2010.
- [15] P. Apkarian, D. Noll, O. Prot. "A proximity control algorithm to minimize nonsmooth and nonconvex semi-infinite maximum eigenvalue functions". **Journal of Convex Analysis**, vol. 16, no. 3&4, 2009, pp. 641-666.
- [16] D. Noll, O. Prot, A. Rondepierre. « A proximity control algorithm to minimize nonsmooth and nonconvex functions". **Pacific Journal of Optimization**, vol. 4, no. 3, 2008, pp. 569-602.

[17] P. Apkarian, D. Noll, A. Rondepierre. "Mixed  $H_2/H^\infty$  control via nonsmooth Optimization". **SIAM Journal on Control and Optimization**, vol. 47, no. 3, 2008, pp. 1516-1546.

[18] P. Apkarian, D. Noll, O. Prot. "A trust region spectral bundle method for nonconvex eigenvalue optimization". **SIAM Journal on Optimization**, vol. 19, no. 1, 2008, pp. 281-306.

[19] L. Chen, A. Miné, P. Cousot. » A sound floating-point interval polyhedra abstract Domain". In Proc. of the 6th Asian Symposium on **Programming Languages and Systems (APLAS 2008)**, vol. 5356 of LNCS, pages 3-18, Springer Verlag, Bangalore, India, Décembre 9--11, 2008.

[20] L. Chen, A. Miné, J. Wang, P. Cousot. "Interval polyhedra: an abstract domain to infer interval linear relationships". In Proc. of the 16th **International Static Analysis Symposium (SAS 2009)**, volume 5673 of LNCS, pages 309--325, Springer Verlag, Los Angeles, CA, USA, août 9--11, 2009.

[21] L. Chen, A. Miné, J. Wang, P. Cousot. "An abstract domain for discovering interval linear equalities". Lecture Notes in **Computer Science 5944**, Pages 112—128, © Springer Verlag, Madrid, 17—19 janvier 2010.

#### ■ Conférences

[22] D. Noll, L. Ravanbod, P. Apkarian. On a "generalization of the LTR procedure". Accepté et sera présenté à la **CCDC 2011**.

[23] L. Ravanbod-Hosseini, D. Noll, P. Apkarian. "Parametric robust  $H_2$  control ». Accepté et sera présenté à la **CCDC 2011**.

[24] M. Gabarrou, D. Alazard, D. Noll. « Structured flight control law design using nonsmooth Optimization". **18th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace (ACA 2010)**, 6 - 10 septembre 2010, Nara, Japon.

[25] M. Gabarrou, D. Alazard, D. Noll. "Optimisation non lisse appliquée à la synthèse de lois de commande de vol structurées ». **Sixième Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)**, Nancy, 2-4 juin 2010.

[26] A. Simoes, P. Apkarian, D. Noll. « Multi-scenario time-domain control design using a nonsmooth approach". VIII. **International Conference on System Identification and Control Problems (SICPRO)**, Moscou 2009.

[27] A. Simoes, P. Apkarian, D. Noll. "Synthèse temporelle de commandes par une approche Nonlisse ». **Conférence Internationale Francophone d'Automatique**, Bucarest, Roumanie 2008.

[28] A. Simoes, P. Apkarian, D. Noll. "Nonsmooth frequency shaping control design with an Application". Présenté au **17th IFAC World Congress**, Seoul, Korea, juillet 6-11, 2008.

[29] O. Bouissou, E. Conquet, P. Cousot, R. Cousot, J. Feret, K. Ghorbal, E. Goubault, D. Lesens, L. Mauborgne, A. Miné, S. Putot, X. Rival, M. Turin. "Space software validation using abstract interpretation". Proceedings of the **30th Data Systems in Aerospace Conference, DASIA'09**, Istanbul, Mai 26-29, 2009.

[30] L. Chen, A. Miné, J. Wang, P. Cousot. "An abstract domain for discovering interval linear equalities". Proc. of the **11th International Conference on Verification**, Model checking and Abstract Interpretation, Gilles Barthe, Manuel V. Hermenegildo (Eds.), © Springer Verlag, Madrid, 17—19 janvier 2010.

[31] P. Cousot, R. Cousot, F. Logozzo. "A Parametric Segmentation Functor for Fully Automatic and Scalable Array Content Analysis", In **Conference Record of the 38th ACM SIGPLAN SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages**, Austin, TX, USA, janvier 26—28, pp. 105—118, 2011. ACM Press, New York.

[32] L. Chen, A. Miné, J. Wang, P. Cousot. "Linear Absolute Value Relation Analysis. 20<sup>th</sup> European Symposium on Programming". mars 26 - April 3, 2011, Saarbrücken, Gilles Barthe (Ed.), Lecture Notes in **Computer Science**, Springer Verlag 2011.

[33] F. Logozzo, V. Laviron, "SubPolyhedra: A (more) scalable approach to infer linear inequalities", Proceedings of the **10th International Conference on Verification**, Model Checking and Abstract Interpretation (VMCAI'09), Springer Verlag, janvier 2009

#### ■ Communications invitées

P. Cousot and R. Cousot. "Scaling up with Abstract Interpretation". In NSF Workshop on Usable Verification, Savannah, GA, USA. January 20th, 2009.

P. Cousot. "Abstract Interpretation and Application to the Static Analysis of Safety-Critical Embedded Computer Software". Seoul National University, Computer Science & Engineering, Distinguished Lecture Series, October 30th, 2008, Seoul, Korea.

P. Cousot. "Static Software Analysis, in the Large". Max Planck Institute for Software Systems, Distinguished Lecture Series, August 26, 2008, Saarbrücken, Building MPI-SWS Saarbrücken, Room 019 (simultaneous videocast at Kaiserslautern, Building MPI-SWS Kaiserslautern, Room 206).

P. Cousot. "Numerical domains for software verification by abstract interpretation". First International Workshop on Numerical Abstractions for Software Verification, NSV 2008 (affiliated with CAV 2008), Princeton, New Jersey, USA, July 8th, 2008.

P. Cousot. "Automatic software verification by abstract interpretation". International Conference on the Foundations of Informatics, Computing and Software, FICS 2008, Shanghai, China, June 3rd, 2008.

P. Cousot. "Why ASTRÉE does scale?" Dagstuhl seminar 08161, « Scalable Program Analysis », Schloss Dagstuhl, Germany April 15th, 2008.

P. Cousot. « La vérification des programmes par interprétation abstraite ». Séminaire de la Chaire d'Innovation technologique - Liliane Bettencourt, Collège de France, 22 février 2008.

P. Cousot. "Software Verification by Abstract Interpretation and the ASTRÉE Static Analyzer". Seminar, Center for Computational and Systems Biology (COSBI), The Microsoft Research — University of Trento, Trento, Italy. February 5th, 2008.

D. Noll. Exposé invité au « *OPTEC workshop on distance measures and eigenvalue optimization* » de l'université catholique de Leuven (Belgique), juin 2008.

D. Noll. Exposé invité au séminaire de mathématiques de l'équipe ACSIOM de l'université Montpellier 2, avril 2009.

D. Noll. Organisation d'un minisymposium avec 3 exposés sur la thématique « optimisation pour la commande des systèmes » au congrès IMPS à Chicago, E.U., en août 2009.

D. Noll. Exposé plénier invité à la Conférence Belge-Franco-Allemande (BFG 2009) à Leuven (Belgique) en septembre 2009.

D. Noll. Conférencier plénier au Workshop Convex Analysis, Optimization and Applications à Les Houches, à l'occasion du 65e anniversaire de C. Lemaréchal, janvier 2010.

D. Noll. Conférencier plénier au Workshop dédié aux 60 ans de Jon Borwein à Vancouver en mai 2011.

**Liste des brevets déposés :** néant

**Liste des logiciels réalisés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final SURVOL*

En conclusion, les objectifs du projet SURVOL étaient certes ambitieux, mais méritaient que l'on tente le rapprochement entre deux équipes dont la qualité scientifique ne fait aucun doute et dont l'activité au sein de ce projet a permis quelques avancées intéressantes, au moins pour l'une d'entre elles, pour l'autre c'est plus difficile à évaluer. Malheureusement l'objectif final du projet SURVOL qui constitue un challenge important, tant sur le plan scientifique que celui des applications industrielles, semble avoir été à peine abordé. Pour ma part, je [Germain GARCIA] trouve que c'est dommage, c'était l'occasion de réellement tenter d'apporter une réponse, même mitigée, à l'important problème auquel prétendait s'attaquer le projet SURVOL.

## Fiche Projet : PROMITI

**Appel à projet : N°4 – Matériaux pour l’Aéronautique et l’espace- 30 avril 2007**

**Acronyme du projet : PROMITI**

**Titre du projet : Approches multiéchelles des PROpriétés et des Microstructures des alliages de Titane b-métastables.**

**Nom et prénom du porteur de projet : Elisabeth GAUTIER– inpl-nancy**

**Expert suiveur : Shiegehis NAKA - ONERA**

**Coût total du projet : 1 483 000 €**

**Montant du financement FRAE : 150 000 €**

**Durée : 42 mois**

### **Noms des partenaires du projet et organismes :**

- CDM - MINES ParisTech UMR
- CNRS 7633
- INSTITUT P' UPR CNRS 3346
- ENSMA -Université Poitiers
- CEMES Toulouse UPR CNRS 8011
- EADS Innovation Works France
- SNECMA
- AUBERT & DUVAL
- MESSIER DOWTY
- AIRBUS Operation SAS

### **Résumé du projet :**

Les alliages de titane b-métastables possèdent d'excellentes propriétés spécifiques (bon rapport résistance/masse). Déjà utilisés pour les disques de turboréacteurs (alliage Ti17), ils s'avèrent intéressants pour l'allègement des structures aéronautiques (alliage Ti555-3 pour le mat réacteur et les trains d'atterrissage) dans des conditions plus sévères de fonctionnement.

Les travaux envisagés au niveau du projet PROMITI ont pour but de fournir les données permettant une meilleure approche prédictive des microstructures aux cours des traitements thermomécaniques, et de les exploiter dans les modèles multiéchelles adéquats, prenant en compte les mécanismes de déformation et d'endommagement, afin de prévoir les propriétés mécaniques, notamment la ténacité et la résistance à la fatigue.

Le projet PROMITI est organisé suivant deux axes, le premier centré sur les relations traitements-microstructures et le second sur les relations microstructures-propriétés.

Les travaux menés dans le premier groupe ont pour but de caractériser les cinétiques de transformation, les microstructures, afin de préciser les mécanismes de leur formation comme les modèles de prévision des microstructures.

Les travaux du second groupe ont pour objectifs de préciser les mécanismes de microdéformation et d'endommagement de ces alliages b-métastables, biphasés, avec une forte proportion de chacune des phases, et d'apporter les données nécessaires au dimensionnement des pièces, tant pour les propriétés de traction, que celles de fatigue et de ténacité. Des études de comportement sont réalisées en traction à plusieurs échelles (microscopie électronique en transmission, microscopie électronique à balayage, essais conventionnels), comme en fatigue et en ténacité. Elles sont menées sur des microstructures modèles afin de comprendre le rôle des paramètres caractéristiques de la microstructure (fraction de phases, distribution spatiale

morphologie des grains et des lamelles, de leur texture locale et mésoscopique). Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux qui sont caractéristiques des microstructures sur pièces industrielles.

Par ailleurs l'étude conduira à un modèle de prévision des microstructures pour l'alliage Ti 5553 et à un modèle de loi de comportement. Ces modèles seront intégrés à une librairie matériau utilisable avec n'importe quel code de calcul de structure par éléments finis.

Ces travaux conduisent à la formation par la recherche de quatre doctorants en partenariat avec les industriels et en forte interaction entre eux et les équipes encadrantes.

#### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

##### ■ Conférences, Congrès

[1] ASettefracti, M. Péqui4gnot, D. Bonina, P. Boulet, B. Dencind, E. Aeby-Gautier, B. Appolaire, J Delfosse, S. Audion SI2M (LSG2M) CNRS Nancy, EADS et AIRBUS, « *Cinétiques de transformation au refroidissement depuis le domaine beta de l'alliage Ti-555.* » **Journées Technologiques de l'Association Titane à Nantes les 26 et 27 mai 2009 (Poster)**

[2] Nicolas Escalé, J. Douin, F. Pettinari-Stwniel, A. Coujou CEMES CNRS Toulouse, « *Caractérisation par Microscopie Electronique en Transmission des micro mécanismes de déformation d'alliages de Titane -métastable.* » **Colloque Plasticité 15-17 Juin 2009 Marseille, Congrès SFMu 2009 (22-26 juin 2009 Paris — Jussieu) , PRIX du meilleur POSTER Colloque plasticité.**

[3] Nicolos Escalé, F. Pettinari-Sturmel, J. Douin, A. Coujou CEMES CNRS Toulouse, « *Caractérisation par Microscopie Electronique en Transmission in situ des micro-mécanismes de déformation d'alliages de Titane -métastable.* » **Colloque Plasticité Toulouse 2010 (8 au 10juin2010)**

[4] A. Setlefrati, F. R. Bruneseaux, M Dehmas, G. Geandier B. Appolaire, E. Aeby-Gautier, 8. Audion, J. Delfosse. SI2M ('LSG2M NRS Nancy, LETAM (Metz), LEM (NRS ONERA Chatillon), EADS et AIRBUS," *Precipitation in near beta titanium alloys on aging. Influence of heating rate and chemical composition of the metastable phase*" **Communication orale acceptée Congrès international PTM Avignon du 6 au 11 juin 2010**

[5] Timo théé Duval, Patrick Villechaise P'-DPMM, Sandra Andrieu, Messler Dowty, « Propriétés mécaniques et mécanismes d'endommagement dtalliages de titane beta métastable. » Communication proposée à **Matériaux 2010** (Octobre à Nantes)

[6] A. Settefrati, M Dehmas, G. Geandier, B. Appolaire, E. Aebv-Gautier, S Audion, J Delfosse. SI2M (LSG2M) CNRS Nancy, LE'TAM (Metz), LEM (CNPS ONERA Chcitillon), EADS et AIRBUS, « *Séquences de précipitation dans l'alliage de titane 13-métastableTiS553* », Communication orale proposée à **Matériaux 2010** (18 au 22 octobre à N antes)

##### ■ Thèses

[7] N. Escale, CEMES-CNRS de Toulouse, avec Aubert & Duval

[8] T. Duval, Pprim (ex-LMPM) de l'ENSMA de Poitiers avec Messier-Bugati-Dowty

[9] A. Settefrati , SI2M/IJL de Nancy (ex-LSG2M/INPL) avec AIRBUS/EADS-IW

[10] G. Martin : CdM de l'ENSMP avec SNECMA

**Liste des brevets déposés :** néant

**Liste des logiciels réalisés :** néant

### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final PROMITI*

Sur le plan des résultats scientifiques, les objectifs scientifiques initialement définis ont été presque entièrement atteints par les quatre partenaires académiques, en apportant de nombreuses connaissances nouvelles.

Le fonctionnement du consortium formé a été excellent. Les communications entre eux me semblaient fluides ; ils ont également organisés fréquemment des réunions de travail bilatérales ou en petit groupe pour traiter des points techniques particuliers.

En plus des quatre thèses toutes soutenues à temps, la production scientifique est tout à fait remarquable avec de nombreuses publications (dans les revues, communications dans les congrès tant internationaux que nationaux, etc. ).

En conclusion, ce projet de grande ambition scientifique (une généralisation de modélisation avec calcul tant sur la génération des microstructures que sur le comportement mécanique) a été achevé avec un grand succès, respectant pleinement les objectifs initialement établis.

## Fiche Projet : QUARTEFT

**Appel à projet : N°6 – Méthodes de vérification des systèmes et logiciels –**  
10 juin 2008

**Acronyme du projet : QUARTEFT**

**Titre du projet : QUALifiable Real TimE Fiacre Transformations**

**Nom et prénom du porteur de projet : François VERNADAT – LAAS-CNRS**

**Expert suiveur : Damien MASSE – Université de Bretagne Occidentale**

**Coût total du projet : 1 898 160 €**

**Montant du financement FRAE : 900 570 €**

**Durée : 36 mois**

### Noms des partenaires du projet et organismes :

- CNRS UMR 5505  
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)
- Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) – Toulouse  
Département Traitement de l'Information et Modélisation (DTIM)
- INRIA Nancy - Grand Est
- AIRBUS FRANCE
- ELLIDISS (PME)

### Résumé du projet :

La complexité croissante des systèmes embarqués critiques temps-réel conduit à exploiter, d'une part des langages de modélisation les plus proches possible des spécifications du métier du concepteur, et d'autre part des outils de vérification de modèle permettant d'assurer la correction du système par rapport aux exigences de sûreté, performance, temps-réel, ... Ces éléments sont ensuite combinés avec des générateurs automatiques de code qualifiés pour assurer une chaîne de développement correcte de bout en bout. Les technologies nécessaires à la construction de ce type d'environnements nécessitent encore des évolutions pour faciliter la définition de langages de haut niveau spécialisés aux différents types de métier tout en assurant la correction nécessaire aux systèmes critiques certifiés.

Le projet QUARTEFT vise à développer les technologies facilitant cette approche en proposant d'une part, une extension temps réel du langage intermédiaire Fiacre, le rapprochant ainsi des langages métiers des systèmes critiques embarqués temps-réel tels que AADL et, d'autre part, de développer les techniques de construction de transformations qui facilitent la preuve de correction et le passage à l'échelle sur des modèles réels. Il s'agit donc de permettre la construction d'une chaîne correcte de transformations des langages utilisateurs vers le langage intermédiaire, puis du langage intermédiaire vers les outils de vérification actuellement disponibles tels que TINA ou CADP. L'expression des transformations et la génération des preuves associées se feront à l'aide de l'outil TOM basé sur des techniques de réécriture. L'ensemble de ces développements sera intégré dans l'outil métier Adele.

QUARTEFT complète les travaux précédemment réalisés dans le cadre des projets COTRE, TOPCASED, SPICES, GENEAUTO pour assurer la construction de nouvelles générations d'ateliers de développement de systèmes critiques temps-réel basées sur la vérification formelle et les langages dédiés. Les méthodes et outils issus du projet QUARTEFT seront intégrés au sein du processus et de la plate-forme de développement de calculateurs embarqués Airbus (activités produit, électronique

et logiciel), issus du projet TOPCASED, de manière à être mis en œuvre opérationnellement sur les futurs programmes avion.

### Liste des publications réalisées (journaux, conférences...):

#### ■ Présentations dans des conférences

- [1] Ali Afroozeh, Jean-Christophe Bach, Mark Van Den Brand, Adrian Johnstone, Maarten Manders, Pierre-Etienne Moreau, and Elizabeth Scott, *Island Grammar-based Parsing using GLL and Tom*, **5th International Conference on Software Language Engineering - SLE 2012**, Dresden, Germany, June 2012
- [2] Nouha Abid, Silvano Dal Zilio, and Didier Le Botlan, *A Verified Approach for Checking Real-Time Specification Patterns*, **6th International Workshop on Verification and Evaluation of Computer and Communication Systems, Electronic Workshops in Computing (eWiC), BCS**, September 2012
- [3] Nouha Abid, Silvano Dal Zilio, and Didier Le Botlan, *Real-Time Specification Patterns and Tools*, FMICS 2012 -- **17th International Workshop on Formal Methods for Industrial Critical Systems**, volume 7437 of Lecture Notes in Computer Science, pages 1—15, Springer-Verlag, September 2012
- [4] Bernard Berthomieu, Jean-Paul Bodeveix, Christelle Chaudet, Silvano Dal Zilio, Mamoun Filali, Marc Pantel, and François Vernadat, *Langage intermédiaire et transformations de modèles pour le développement de systèmes temps-réel: retour d'expérience sur la chaîne de vérification formelle Fiacre*, **Journées sur l'Ingénierie Dirigée par les Modèles**, March 2010
- [5] Bernard Berthomieu, Jean-Paul Bodeveix, Silvano Dal Zilio, Patrick Farail, Mamoun Filali, Pierre Gaufilllet, and François Vernadat, *La traduction AADL-FIACRE: l'expérience TOPCASED* (regular paper), **Approches Formelles dans l'Assistance au Développement de Logiciels (AFADL)**, Grenoble, 11/01/2012-13/01/2012, pages 8--8. LCIS/LI, Grenoble, janvier 2012
- [6] Bernard Berthomieu, Jean-Paul Bodeveix, Silvano Dal Zilio, Mamoun Filali, and François Vernadat, *Model-Checking Support for AADL, Architecture-Driven Semantic Analysis of Embedded Systems*, pages 34—34, **Dagstuhl Reports**, Schloss Dagstuhl, July 2012
- [7] Jean-Paul Bodeveix, Abdeldjalil Boudjadar, and Mamoun Filali, *An Alternative Definition for Timed Automata Composition* (regular paper), **Automated Technology for Verification and Analysis**, Taipei, Taiwan, 11/10/2011-14/10/2011, volume 6996 of Lecture Notes in Computer Science, pages 105--119, <http://www.springerlink.com/>, octobre 2011, Springer-Verlag
- [8] Abdeldjalil Boudjadar, Jean-Paul Bodeveix, and Mamoun Filali, *Compositional Refinement for Real-Time Systems with Priorities* (regular paper), **International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME)**, Leicester, United Kingdom, 12/09/2012-14/09/2012, pages 57--64, <http://www.computer.org>, septembre 2012, IEEE Computer Society
- [9] Abdeldjalil Boudjadar, Jean-Paul Bodeveix, and Mamoun Filali, *Revising and Extending the Uppaal Communication Mechanism*, volume 7306 of **Lecture Notes in Computer Science**, Springer-Verlag, <http://www.springerlink.com/>, juin 2012
- [10] Jean-Christophe Bach, Xavier Crégut, Pierre-Etienne Moreau, and Marc Pantel, *Model transformations with Tom*, **LDTA**, Tallinn, Estonia, 2012

- [11] Jean-Christophe Bach, Pierre-Etienne Moreau, and Marc Pantel, *Tom-based tools to transform EMF models in avionics context*, **ITSLE**, Dresden, Germany, 2012
- [12] Benoit Combemale, Xavier Crégut, and Marc Pantel, *A Design Pattern to Build Executable DSMLs and associated V&V tools*, **The 19th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC 2012)**, Hong Kong, Hong Kong, December 2012, IEEE
- [13] Peter Feiler, Jérôme Hugues, and Oleg Sokolsky, *Architecture-Driven Semantic Analysis of Embedded Systems* (Dagstuhl Seminar 12272), **Dagstuhl Reports**, 2(7):30--55, 2012
- [14] Manuel Garnacho, Jean-Paul Bodeveix, and Mamoun Filali, *Mechanized Semantics of Concurrent Systems with Priorities*, **Submitted to FoSSaCS 2013**, 2012
- [15] Manuel Garnacho, Jean-Paul Bodeveix, and Mamoun Filali, *Mechanized Semantics of Real-Time Concurrent Systems*, **Submitted to FoSSaCS 2013**, 2012
- [16] Manuel Garnacho, Jean-Paul Bodeveix, Mamoun Filali, and Zhibin Yang, *On the mechanization of AADL subsets*, *Architecture-Driven Semantic Analysis of Embedded Systems*, pages 35—35, **Dagstuhl Reports**, Schloss Dagstuhl, july 2012
- [17] Tiziana Margaria and Bernhard Steffen, *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Applications and Case Studies*, **5th International Symposium**, ISoLA 2012, Heraklion, Crete, Greece, October 15-18, 2012
- [18] Faiez Zalila, Xavier Crégut, and Marc Pantel, *Leveraging formal verification tools for dsml users: A process modeling case study*, **Margaria and Steffen**, pages 329--343

#### ■ Thèses en relation avec le projet

- [19] Nouha Abid, *Verification of Real-Time Properties in the Fiacre Language*, Thèse, **INSA de Toulouse**, December 2012
- [20] Abdeldjalil Boudjadar, *Sémantique Compositionnelle et Raffinement de Systèmes Temporisés. Application aux Automates temporisés d'Uppaal et au Langage Fiacre*, Thèse de doctorat, **Université de Toulouse**, Toulouse, France, décembre 2012
- [21] Claudia Tavares, *Un système de types pour la programmation par réécriture embarquée*, PhD thesis, **Université Henri Poincaré - Nancy I**, March 2012

**Liste des brevets déposés :** néant

#### **Analyse succincte de la complétude de l'action**

*Sources : Rapport final expert QUARTEFT*

QUARTEFT a permis de développer une nouvelle chaîne modulaire bénéficiant des aspects génériques de Fiacre et de la bibliothèque RT-Fiacre. Pour les propriétés, un jeu explicite de

propriétés basé sur les patterns a été mis à disposition ainsi que la possibilité de définir directement des propriétés « utilisateur » au niveau Fiacre. La vérification de ces nouvelles formes de propriétés a été intégrée. Parmi les perspectives envisagées, on peut citer la « mécanisation » de la bibliothèque avec l'expression formelle des composants de la bibliothèque et l'aide à l'interprétation des retours de vérification.

QUARTEFT a également permis d'étendre Tom avec Tom-EMF qui comporte un générateur d'ancrages algébriques pour EMF et d'expérimenter celui-ci à travers des transformations AADL et RT-Fiacre.

QUARTEFT a aussi permis de développer un îlot formel déclaratif pour les transformations de modèles et une première application dans le cadre de transformations de SimplePDL vers Tina.

QUARTEFT a enfin permis la définition et mécanisation d'un noyau sémantique de Fiacre qui constitue le socle de vérification sémantique de toute transformation. Parmi les perspectives envisagées, on peut citer :

- la définition et vérification de nouvelles constructions RT-Fiacre, vérification d'études de cas d'études paramétrés. Utilisation de la mécanisation pour prouver correction spécification AADL vers RT-Fiacre ;
- concernant Tom, l'expérimentation de l'îlot de transformation à la transformation AADL vers RT-Fiacre. L'exploitation des liens de traçabilité pour faciliter les retours de vérification.

L'expérimentation a montré la bonne adéquation du couple RT-Fiacre/Fiacre dans le contexte de système Mauve. QUARTEFT a permis de disposer d'un outil de vérification complet pour les systèmes décrits en Mauve. Le travail de modélisation et les expérimentations réalisées ont permis de remettre en cause la méthodologie de conception proposée et certaines caractéristiques du middleware employé. Parmi les perspectives envisagées, on peut citer :

- Une aide au retour de vérification (niveau Mauve),
- la définition de « Patches » sur le middleware et une meilleure prise en compte de la préemption.

QUARTEFT a pris en compte la version AADL V2 - y compris l'annexe comportementale et ainsi permis de disposer d'une chaîne de vérification pour AADL V2. Le découpage ``langage Fiacre / bibliothèque RT-Fiacre" a permis de disposer d'une chaîne modulaire et extensible sans pour autant perdre en efficacité. Le projet a permis une expérimentation positive grandeur nature de Tom-EMF. D'un point de vue purement AADL, les travaux de modélisation des composants et protocoles AADL ont permis de vérifier la sémantique AADL. Parmi les perspectives envisagées, on peut citer :

- l'extension du périmètre AADL
- la prise en compte de la préemption.