

## Visite de presse

### Propulsion, énergie, environnement ICARE s'envole

mercredi 11 juillet 2007  
CNRS, Orléans

# DOSSIER DE PRESSE

#### Contact chercheur

Iskender Gökalp – T 02 38 25 54 63 – gokalp@cnrs-orleans.fr

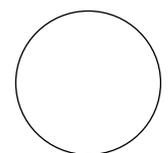
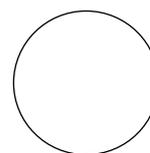
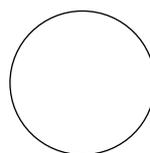
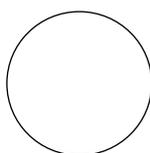
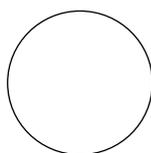
#### Contacts presse

Martine Hasler  
T 01 44 96 46 35  
martine.hasler@cnrs-dir.fr

Cécile Pérol  
T 01 44 96 43 09  
cecile.perol@cnrs-dir.fr

#### Communication département ST2I

Arlette Goupy  
T 01 44 96 42 14  
arlette.goupy@cnrs-dir.fr



# Sommaire

## > Présentation d'ICARE

### > Propulsion – Espace

- Réactions élémentaires impliquant les atomes H et O
- Etudes numériques sur la combustion supersonique
- Systèmes hypergoliques
- Combustion de particules d'aluminium et de magnésium
- La propulsion à plasma pour les satellites et les sondes interplanétaires
- Les écoulements supersoniques et hypersoniques des plasmas
- Vol hypersonique en aérobie
- Simulation des rentrées planétaires

### > Propulsion – Energie - Environnement

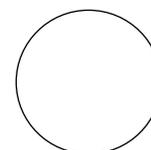
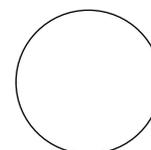
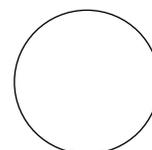
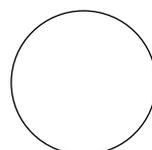
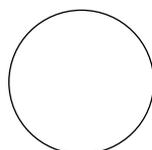
- Vaporisation et combustion de gouttes en microgravité>>
- Atomisation et combustion des sprays
- Combustion turbulente

### > Energie - Environnement

- Cinétique chimique et structure de flammes à haute pression
- Etude de flammes laminaires
- Formation de polluants à partir de mélanges représentatifs d'essences
- Formation de particules de suies dans les carburants
- Thermochimie des esters d'huiles végétales
- Cinétique de la combustion du « biodiesel »
- Réactivité atmosphérique
- Méthodes d'estimation des points-éclairs et de limites inférieures d'inflammabilité
- Accélération de flamme en présence d'obstacles répétés
- Action d'un champ magnétique sur la stabilité d'une flamme de diffusion laminaire
- Combustion assistée par plasma

## > Présentation du département ST2I

## > Photos



# PRÉSENTATION D'ICARE

## INSTITUT DE COMBUSTION, AÉROTHERMIQUE, RÉACTIVITÉ ET ENVIRONNEMENT

DOSSIER DE PRESSE - ORLÉANS – 11 JUILLET 2007

[www.cnrs.fr/presse](http://www.cnrs.fr/presse)

**ICARE (CNRS/ département Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie), est né le 1<sup>er</sup> janvier 2007 de la réunion de deux unités propres du CNRS : le Laboratoire d'aérotthermique et le Laboratoire de combustion et systèmes réactifs. Ce regroupement permet de renforcer la contribution de la recherche au développement des technologies aérospatiales françaises et d'augmenter sa visibilité européenne et internationale. ICARE intervient dans les domaines de la propulsion, de l'énergie et de l'environnement. Il conduit ses recherches avec de nombreux partenaires académiques et industriels et collabore à des programmes européens, nationaux et régionaux (voir encadré).**

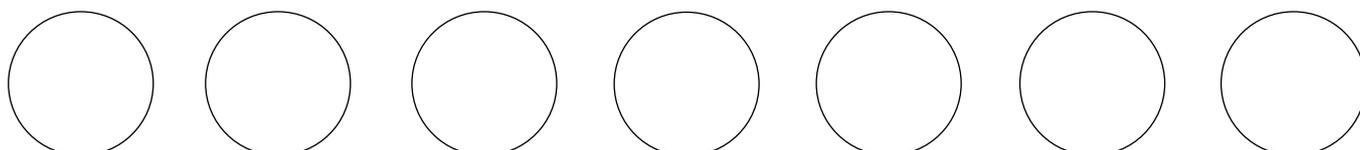
Dans le domaine de la **propulsion aérospatiale**, les souffleries et autres moyens d'essais d'ICARE sont exceptionnels et souvent uniques en Europe. En particulier PIVOINE, moyen d'essai national sur la propulsion spatiale à plasma, constitue le fleuron du CNRS dans ce domaine de très haute technologie. S'y ajoutent des programmes sur la propulsion liquide et solide pour Ariane 5, la propulsion aérobie<sup>1</sup> à grande vitesse pour le programme de démonstration de vol hypersonique LEA, la propulsion par détonation pulsée ou continue, et des études sur les écoulements hypersoniques pour les rentrées atmosphériques (Terre, Mars, Titan).

*Plusieurs programmes d'ICARE ont été présentés dans le cadre de la deuxième Conférence européenne pour les sciences aérospatiales (EUCASS) qui s'est tenue à Bruxelles, du 1<sup>er</sup> au 6 juillet 2007.*

Dans le domaine de l'**énergie**, ICARE développe des programmes de recherche innovants nationaux et européens concernant notamment : **les carburants automobiles** (réduction des émissions et qualification des biocarburants) ; la production d'électricité par **des turbines à gaz utilisant des combustibles alternatifs** comme le biogaz, le syngaz et d'autres combustibles hydrogénés. Dans le domaine de l'aéronautique, ICARE participe aux efforts français et européens pour la qualification d'un **bio-kérosène**. L'institut coordonne par ailleurs un programme franco-italien sur la **production et la sécurité de l'hydrogène**.

Dans le domaine de la **chimie atmosphérique liée à l'environnement**, ICARE participe à divers programmes européens. La chambre de simulation atmosphérique d'ICARE fait partie des installations reconnues à l'échelle européenne pour effectuer des études sur le devenir atmosphérique de diverses émissions polluantes.

<sup>1</sup>Aérobie : faisant appel à l'oxygène de l'air pour alimenter la réaction de combustion



ICARE participe également à la plate-forme technologique européenne « Zero Emission Fossil Fuel Power Plants » (ETP-ZEP) dont l'objectif est de préparer les **technologies futures utilisant les combustibles fossiles sans émettre de CO<sub>2</sub>**. Elles impliquent le développement de nouvelles technologies de combustion pour faciliter la capture de CO<sub>2</sub> : oxy-combustion pour le procédé « capture post-combustion » ou combustion de l'hydrogène pour le procédé « capture pré-combustion ».

*Le premier projet européen de démonstration de capture et de stockage souterrain de CO<sub>2</sub> a été inauguré le 13 juin 2007 à Ketzin (près de Berlin)*

### ICARE

**Effectifs** : 125 chercheurs, ingénieurs et techniciens du CNRS, enseignants-chercheurs de l'Université d'Orléans et doctorants (40)

**Partenaires** : le CNES, l'Agence spatiale européenne (ESA), la Snecma, Turbomeca, Airbus, la Société nationale des poudres et explosifs (SNPE), MBDA, ROXEL, Total, Air Liquide, Renault, PSA Peugeot Citroën, le CEA, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) l'IFP, SIEMENS, General Electric, l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), QINETIQ, Surrey Satellite Technologies, etc...

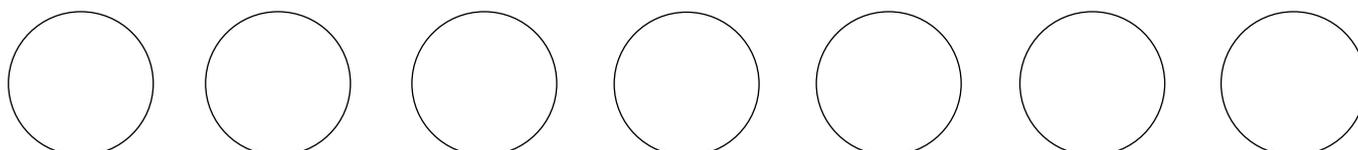
De nombreux projets sont aussi réalisés dans le cadre de divers programmes de la Commission européenne ou dans celui de coopérations nationales et régionales (programmes ANR, CNRT-propulsion du futur Bourges-Orléans, pôle de compétitivité espace et systèmes embarqués, pôle de compétitivité TRIMATEC, etc.)

### CONTACTS

Presse  
Martine Hasler  
T 01 44 96 46 35  
martine.hasler@cnrs-dir.fr

Cécile Pérol  
T 01 44 96 43 09  
cecile.perol@cnrs-dir.fr

Communication département ST2I  
Arlette Goupy  
T 01 44 96 42 14  
arlette.goupy@cnrs-dir.fr  
<http://www.cnrs.fr/st2i/>



## RÉACTIONS ÉLÉMENTAIRES IMPLIQUANT LES ATOMES H ET O APPLICATION A LA PROPULSION SPATIALE

La simulation du fonctionnement des systèmes de propulsion utilisant comme combustibles l'hydrogène et l'air ou l'oxygène (les statoréacteurs supersoniques ou les moteurs fusées comme le moteur Vulcain d'Ariane 5) fait appel à la cinétique chimique de combustion. Dans de tels systèmes de propulsion, où les temps de résidence des combustibles dans la chambre de combustion sont très courts (à cause des grandes vitesses mises en jeu), l'efficacité de la combustion est limitée d'une part par la dynamique de mélange des réactifs et, d'autre part, par la cinétique réactionnelle.

Le rendement d'un système de propulsion (sa poussée) dépend en partie de l'efficacité de la recombinaison des radicaux et atomes (H, O, OH) présents dans la chambre de combustion. Les performances des super-statoréacteurs et des moteurs fusées, améliorées par le dimensionnement des chambres de combustion et des tuyères d'échappement, sont liées à la connaissance des vitesses de réactions élémentaires de l'hydrogène à très hautes températures (2 000 à 4 500 K).

ICARE a développé un réacteur idéal, le tube à choc, couplé à une méthode d'absorption par résonance atomique (ARAS) permettant de suivre l'évolution de la concentration des atomes O et H à l'échelle de la microseconde.

Utiles pour l'analyse des concepts de propulsion spatiale, ces études permettent d'améliorer les connaissances sur la combustion de l'hydrogène et, d'une manière plus large, ceux des hydrocarbures.

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Sandra Javoy  
[paillard@cns-orleans.fr](mailto:paillard@cns-orleans.fr) ; [javoy@cns-orleans.fr](mailto:javoy@cns-orleans.fr)



Tube à choc couplé à l'ARAS (absorption par résonance atomique) © ICARE-CNRS.

---

<sup>1</sup> Moteur à réaction sans parties tournantes

## ÉTUDES NUMÉRIQUES SUR LA COMBUSTION SUPERSONIQUE

Depuis les années 1990 (dans le cadre du programme russe « Kholod », 1991-1998), plusieurs études ont été menées afin d'augmenter les performances des superstatoréacteurs à des nombres de Mach de vol entre 5,6 et 6,5. Dans les années 2002-2007, la limite de vitesse a été progressivement augmentée jusqu'à Mach 10, grâce aux vols expérimentaux effectués dans le cadre des programmes HyShot (Australie), Hyper X (NASA) et HyCAUSE (Australie/États-Unis). En France, le programme franco-russe LEA mené par MBDA France et l'ONERA a pour but de mener des essais en vol d'un démonstrateur hypersonique jusqu'à Mach 8.

Dans ce contexte, des recherches intensives sont menées à ICARE sur les statoréacteurs à combustion supersonique (ou superstatoréacteur), qui permettraient à un véhicule de voler à des vitesses hypersoniques.

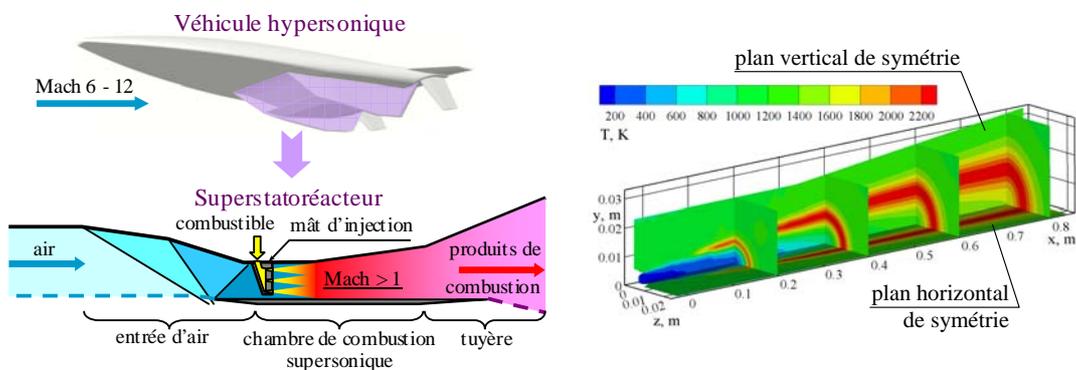
L'élément clef du superstatoréacteur est sa chambre de combustion dont les processus internes à partir de l'injection du combustible jusqu'à sa combustion complète ont lieu dans un écoulement supersonique. Vu le temps de séjour extrêmement court (inférieur à une milliseconde), le mélange, l'inflammation et la combustion doivent être très rapides afin d'atteindre une haute efficacité du moteur. La mise au point des processus de combustion supersonique nécessite des études théoriques, expérimentales et numériques.

Une étude numérique sur la combustion supersonique de l'hydrogène et du mélange méthane-hydrogène est effectuée à l'ICARE dans le cadre d'une collaboration avec MBDA France et l'ONERA. Les conditions de cette étude correspondent aux essais expérimentaux dans la chambre LAERTE de l'ONERA : Mach égal à 2 (vitesse 1400 m/s) et température proche de 1200 K à l'entrée de la chambre. Lors de cette étude, le modèle de turbulence décrivant le processus de mélange a été amélioré afin de le rendre applicable aux jets supersoniques. Un autre aspect important consiste en l'élaboration d'un modèle chimique réduit permettant des calculs multidimensionnels de l'écoulement réactif.

### Contact

Dmitry Davidenko

[davidenko@cnsr-orleans.fr](mailto:davidenko@cnsr-orleans.fr)



À gauche, vue d'un véhicule hypersonique et principe de fonctionnement d'un superstatoréacteur ; à droite, champ 3D de température issu d'une simulation de la chambre LAERTE ; © ICARE-CNRS.

<sup>1</sup> Moteur à réaction sans parties tournantes

## SYSTÈMES HYPERGOLIQUES

Les systèmes hypergoliques<sup>1</sup> sont utilisés pour alimenter les moteurs fusées dits « à énergie stockable ». Ils équipent le deuxième étage d'Ariane V, d'autres fusées et satellites. Ils offrent l'avantage d'être simples dans leur principe de fonctionnement et ne nécessitent aucune source d'inflammation car l'allumage s'effectue par simple contact entre l'oxydant et le réducteur.

Les moteurs qui utilisent des mélanges hypergoliques ont l'inconvénient de rejeter des polluants nocifs pour l'environnement spatial, qui sont aussi corrosifs pour les panneaux solaires des satellites.

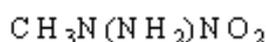
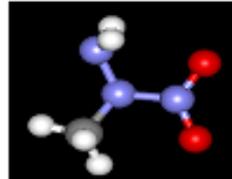
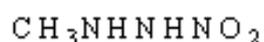
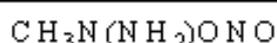
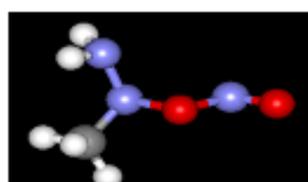
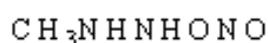
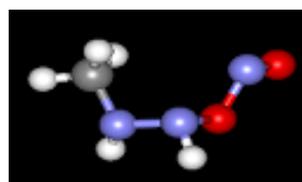
La méthode expérimentale développée à l'ICARE, avec le soutien du CNES, consiste à déterminer la limite d'hypergolicité en fonction de la composition et de la pression de la phase gazeuse. Elle a également pour but de rechercher de nouvelles compositions hypergoliques moins polluantes, tout en conservant les performances en impulsion spécifique des systèmes actuels.

Expérimentalement on injecte l'oxydant dans le réducteur dilué par un gaz inerte. On note les conditions à la limite d'explosion en fonction de la richesse du mélange. On déduit de ces expériences la limite d'hypergolicité et le critère thermocinétique de limite d'hypergolicité. Avec un modèle cinétique détaillé, il est possible de déterminer le délai d'emballement de la réaction et de calculer la température de flamme correspondante. Dans des systèmes hypergoliques en cours de développement, l'oxygène est remplacé par le peroxyde d'oxygène, et le peroxyde d'azote.

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Nabih Chaumeix, Laurent Catoire

[paillard@cnrs-orleans.fr](mailto:paillard@cnrs-orleans.fr) ; [chaumeix@cnrs-orleans.fr](mailto:chaumeix@cnrs-orleans.fr) ; [catoire@cnrs-orleans.fr](mailto:catoire@cnrs-orleans.fr)



Espèces chimiques susceptibles de se former lors de l'inflammation hypergolique à basse température ; © ICARE-CNRS.

---

<sup>1</sup> Système de combustion qui ne nécessite aucune forme d'inflammation et donc pour lequel il n'est pas nécessaire de gérer un système d'allumage.

## COMBUSTION DE PARTICULES D'ALUMINIUM ET DE MAGNÉSIUM

Dans le contexte d'optimisation des performances des propulseurs des moteurs-fusées (par exemple les boosters d'Ariane 5) qui incorporent dans leurs propergols solides des particules métalliques, ICARE mène diverses recherches sur la combustion des particules métalliques d'aluminium et de magnésium.

L'objectif global des études est d'établir les modèles de combustion d'une particule métallique en fonction de la pression et de la composition du gaz ambiant, mais aussi de la taille et de la composition initiales de la particule.

Des installations spécifiques ont été développées pour réaliser ces études. Un « lévitateur » de particule métallique a été mis au point ; il permet, à l'aide d'un tir laser (laser CO<sub>2</sub> à haute puissance), d'initier la combustion de celle-ci. Les régimes de combustion sont déterminés à l'aide de la vidéographie et de la cinématographie ultra-rapides. En complément à ces études, la combustion de particules a été étudiée en vols paraboliques, pour s'affranchir du phénomène de convection naturelle induite par la gravité terrestre et simuler les conditions lunaires ou martiennes.

Parmi les objectifs de ces études, on peut aussi citer la proposition de moyens de propulsion sur Mars en utilisant comme oxydant le CO<sub>2</sub> martien et des particules métalliques emportées de la Terre, l'amélioration de la performances des propergols aluminisés en utilisant des particules nanométriques ou recouvertes d'une autre couche métallique comme le nickel, mais aussi la production d'hydrogène par la combustion de particules d'aluminium.

Ces recherches sont menées en collaboration avec l'ESA, le CNES, l'ONERA, SNPE, ALCAN et SSTL, Surrey.

### Contacts

Iskender Gökalp, Christian Chauveau

[gokalp@cnsr-orleans.fr](mailto:gokalp@cnsr-orleans.fr) ; [chauveau@cnsr-orleans.fr](mailto:chauveau@cnsr-orleans.fr)



Combustion d'une particule de magnésium de diamètre 50 microns dans du CO<sub>2</sub> et en microgravité

## LA PROPULSION À PLASMA POUR LES SATELLITES ET LES SONDES INTERPLANÉTAIRES PRÉPARER AUJOURD'HUI LES MISSIONS SPATIALES DE DEMAIN

Le moyen d'essais national PIVOINE pour la propulsion spatiale à plasma, avait joué un rôle clef lors de la mise au point du propulseur à effet Hall PPS®1350-G conçu et développé par la Snecma qui en équipa la sonde lunaire de la mission SMART-1 de l'Agence spatiale européenne. Un moyen d'essai de « deuxième génération », PIVOINE-2g, a été doté d'un nouvel ensemble de pompage cryogénique à haute performance et d'un système de pilotage et d'acquisition de données entièrement informatisé.

Le moyen d'essais PIVOINE-2g dispose de qualités exceptionnelles de simulation du vide spatial qui en font un outil unique en Europe dans le domaine de la propulsion à effet Hall. Le développement de propulseurs à puissance forte (5-10kW), nécessaires pour des manœuvres de transfert d'orbite et de contrôle de trajectoire des satellites de télécommunication à grande capacité (internet à haut débit, télévision numérique), ainsi que pour les futures missions d'exploration planétaire, est en cours.

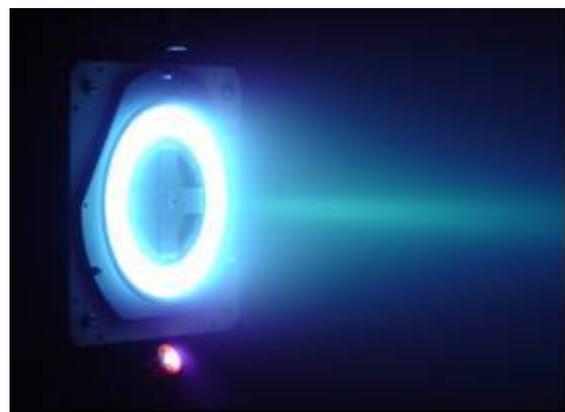
Des expériences ont déjà été menées à l'ICARE. Cette année, le propulseur PPS®X000 (modèle de laboratoire) a fonctionné à 7 kW en délivrant plus de 0,350 N de poussée et une impulsion spécifique de 3200 s. C'est un record qui ouvre la voie à d'ambitieuses missions.

Le groupement de recherche associant le CNRS, le CNES, la Snecma et plusieurs Universités, dispose avec PIVOINE-2g et l'ensemble de diagnostics associés (caméra CCD, thermographie IR, spectroscopie laser, analyseur d'énergie à temps de vol, *etc.*), d'un outil unique au monde qui va permettre aux chercheurs de progresser sur la compréhension des mécanismes physiques sous-jacents à ces sources à plasma magnétisé (transport des électrons à travers un champ magnétique, interactions plasma/paroi, production d'ions multichargés à haute tension). Cet outil permettra également de proposer des propulseurs novateurs capables de fonctionner à très forte puissance (production de poussée > 1 N<sup>1</sup> et impulsion spécifique > 3000 s avec des durées de vie > 10000 heures) pour répondre aux besoins futurs des opérateurs de satellites de communication et d'observation et ceux des agences spatiales française et européenne.

### Contacts

Michel Dudeck, Stéphane Mazouffre

[dudeck@cnrs-orleans.fr](mailto:dudeck@cnrs-orleans.fr) ; [mazouffre@cnrs-orleans.fr](mailto:mazouffre@cnrs-orleans.fr)



À gauche : Image de synthèse du propulseur à plasma PPS®1350-G de la sonde lunaire SMART-1 de l'Agence Spatiale Européenne. À droite : Photographie du faisceau d'ions xénon lors d'un tir du propulseur à plasma PPS®X000 dans le moyen d'essais PIVOINE-2g. La couronne lumineuse correspond au plasma produit à l'intérieur du propulseur, avant son éjection ; © ICARE-CNRS.

<sup>1</sup> Newton : l'unité de force

## LES ÉCOULEMENTS SUPERSONIQUES ET HYPERSONIQUES DES PLASMAS AU SERVICE DU CONTRÔLE D'ÉCOULEMENTS

L'institut ICARE participe au développement de l'« aérodynamique du futur » grâce à son moyen d'essais MARHy (soufflerie à Mach Adaptable Raréfié Hypersonique). Ce développement consiste en l'étude d'écoulements supersoniques et hypersoniques (de 262 à 1 634 m/s) raréfiés (la pression atmosphérique est divisée jusqu'à un million) et à leur contrôle au moyen de décharges électriques. Une large gamme de tuyères est utilisée pour modifier les caractéristiques de ces écoulements. Ce moyen d'essais se distingue par son groupe de pompage<sup>1</sup> unique en Europe, car il a la particularité de fonctionner en continu et s'approche donc des conditions réelles d'un engin en vol.

Entre autres expériences novatrices, l'influence d'une décharge électrique sur un écoulement supersonique raréfié le long d'une plaque plane est étudiée. Cette décharge permet de créer un plasma, et ce dernier de modifier l'écoulement par effet de ionisation (modification des profils de vitesse, de la position de l'onde de choc, de la traînée et donc de la performance aérodynamique). Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer la modification de l'écoulement par création d'un plasma. Les électrons présents dans la décharge sont accélérés et pourraient localement chauffer le gaz, modifiant alors les propriétés de l'écoulement d'air. La notion de « vent ionique » est également avancée. Les ions présents dans la décharge seraient accélérés par le champ électrique et, par collision, transmettraient leur quantité de mouvement aux molécules neutres (un peu comme une boule de billard qui en rencontre une autre). Il en découlerait une modification du profil des vitesses de l'écoulement. Ces deux phénomènes pourraient aussi agir simultanément.

### Contacts

Jean-Claude Lengrand, Éric Depussay

[lengrand@cnsr-orleans.fr](mailto:lengrand@cnsr-orleans.fr) ; [depussay@cnsr-orleans.fr](mailto:depussay@cnsr-orleans.fr)



MARHy et son environnement expérimental ; le groupe de pompage ; jeu de tuyères utilisées dans le moyen d'essais MARHy ; © ICARE-CNRS.

<sup>1</sup> Système qui aspire l'air à grand débit pour faire le vide

## VOL HYPERSONIQUE EN AÉROBIE

Dans le cadre du développement des prochains véhicules hypersoniques<sup>1</sup>, ICARE étudie et développe en collaboration avec MBDA France et l'ONERA un prototype-démonstrateur capable de voler à Mach 4 à 8, à une altitude de 20 à 30 kilomètres (stratosphère), en aérobie, c'est-à-dire dans l'air ambiant. L'essai « grandeur nature » de cet engin équipé d'un statoréacteur<sup>2</sup> est prévu en 2012.

Différents phénomènes aérodynamiques et aérothermodynamiques sont étudiés à ICARE afin d'assurer la réussite de ce vol expérimental. Dans ce but, l'Institut étudie par exemple la combustion supersonique<sup>3</sup> qui caractérisera le mode de propulsion des véhicules hypersoniques.

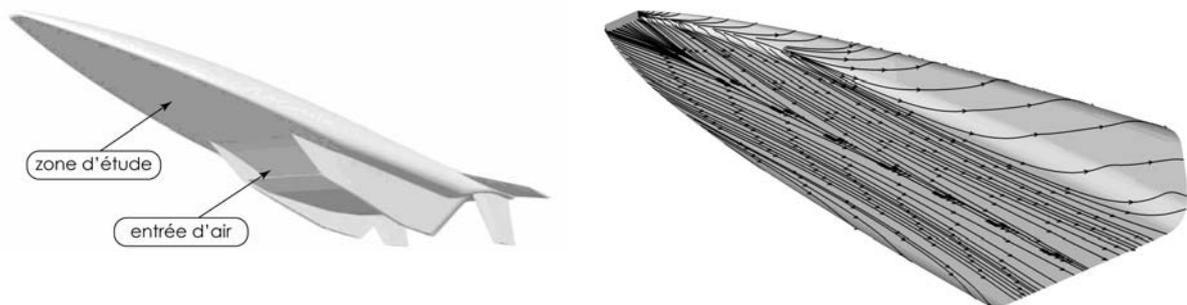
De même, la couche limite qui se développe sous l'avant-corps du véhicule, à l'entrée du moteur, est étudiée afin de prévoir et contrôler la transition laminaire-turbulent, en hypersonique aérobie. Cette transition laminaire-turbulent est étudiée à ICARE à l'aide de simulations numériques qui reproduisent les conditions de vol.

Ces simulations, réalisées à l'aide du code commercial FLUENT®, sont complétées par une analyse de stabilité de la couche limite (code de calcul développé à ICARE). Les résultats obtenus s'avèrent précieux pour déterminer les mécanismes d'instabilité qui entrent en jeu, leurs fréquences, et leurs taux d'amplification.

La récolte de ces informations permettra de concevoir des dispositifs de déstabilisation passifs ou actifs (système de rugosité paramétrable). Ceux-ci permettront de provoquer la transition laminaire-turbulent grâce à l'excitation des modes identifiés.

### Contacts

Ivan Fedioun, Dmitry Davidenko  
[fedioun@cns-orleans.fr](mailto:fedioun@cns-orleans.fr) ; [davidenko@cns-orleans.fr](mailto:davidenko@cns-orleans.fr)



À gauche, vue d'artiste du véhicule étudié montrant la zone d'étude et l'entrée d'air. À droite, lignes de frottement pariétal sur l'avant-corps. © ONERA/ICARE-CNRS, Ivan Fedioun.

<sup>1</sup> Véhicules se déplaçant à une vitesse bien supérieure à la vitesse du son

<sup>2</sup> Moteur à réaction sans parties tournantes

<sup>3</sup> Combustion dont la vitesse d'écoulement du carburant qui l'alimente est supérieure à la vitesse du son

## SIMULATION DES RENTRÉES PLANÉTAIRES

L'exploration des planètes proches et lointaines de la Terre est devenue un centre d'intérêt majeur de ce début de XXI<sup>e</sup> siècle. Depuis la mise en place de la station orbitale internationale, l'ESA, la NASA et le CNES mènent des recherches sur les vols habités de longue durée qui permettraient à l'homme de se rendre sur la planète Mars et sur Titan, le plus gros satellite de Saturne. De nombreuses missions préparatoires (Mars Express, Beagle 2, Spirit, Huygens) sont programmées pour l'horizon 2011.

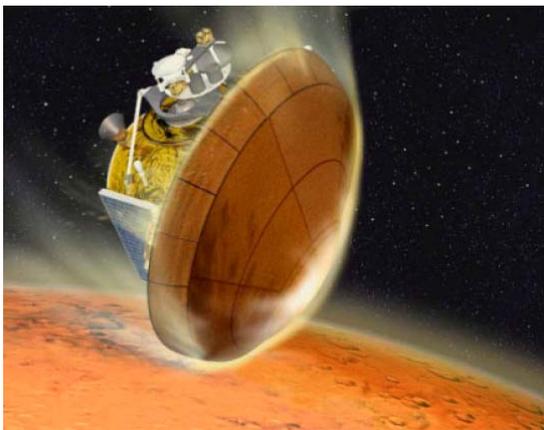
Grâce au moyen d'essais PHÉDRA, unique en France (soufflerie à Plasma Hors Équilibre De Rentrées Atmosphériques), ICARE est à même de simuler des rentrées atmosphériques en reproduisant des conditions de vol hypersonique à haute altitude et à haute température. La chambre de simulation, reliée à un groupe de pompage d'une capacité de 26 000 m<sup>3</sup>/h, est équipée d'une torche à plasma capable de générer des jets supersoniques, lesquels reproduisent une atmosphère planétaire. PHÉDRA permet de reproduire des rentrées planétaires dans l'atmosphère de Mars, de Titan et de la Terre.

Des moyens de diagnostic spécifiques ont été développés pour la soufflerie afin de déterminer différentes propriétés physico-chimiques des atmosphères visées : sondes électrostatiques pour explorer les populations d'électrons ; spectroscopie d'émission pour étudier les molécules responsables des flux radiatifs ; fluorescence induite par laser pour déterminer la vitesse des jets de plasma, sondes de température, *etc.*

### Contacts

Michel Dudeck, Viviana Lago

[dudeck@cns-orleans.fr](mailto:dudeck@cns-orleans.fr) ; [lago@cns-orleans.fr](mailto:lago@cns-orleans.fr)



À gauche, vue d'artiste de l'orbiteur *Mars Explorer* ; à droite, Interaction entre un jet supersonique de plasma obtenu à partir d'un mélange CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> et une sphère métallique ; © ICARE-CNRS.

## VAPORISATION ET COMBUSTION DE GOUTTES EN MICROGRAVITÉ

Dans les recherches sur la combustion, les conditions de microgravité ou d'apesanteur sont utilisées pour plusieurs raisons. D'un point de vue recherche de base, elles permettent de réduire les effets de la convection naturelle due à la gravité terrestre et qui souvent masquent les phénomènes étudiés ; d'autre part elles sont utiles pour se rapprocher des conditions prévalentes sur la Lune, Mars ou dans la Station spatiale internationale.

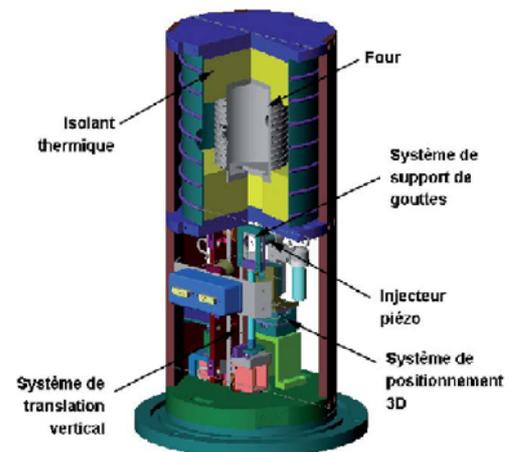
Depuis plusieurs années, ICARE poursuit des études de combustion et de vaporisation de gouttes liquides et de particules métalliques en conditions de microgravité en utilisant les vols paraboliques d'avions-laboratoires, les tours de chute libre ou les vols des fusées-sondes.

Ces études ont permis de déterminer par exemple les temps de combustion et de vaporisation des gouttes et des particules avec et sans gravité terrestre et de modéliser ainsi l'effet de celle-ci.

Ces recherches sont menées en étroite collaboration avec l'ESA, le CNES et aussi des équipes japonaises comme celles de l'Osaka Prefecture University et de l'Université de Tokyo,

### Contacts

Iskender Gökalp, Christian Chaveau  
[gokalp@cns-orleans.fr](mailto:gokalp@cns-orleans.fr) ; [chaveau@cns-orleans.fr](mailto:chaveau@cns-orleans.fr)



À gauche, l'expérience de combustion de gouttes en microgravité (vol parabolique de l'Airbus ZeroG du CNES) ; à droite, représentation schématique du dispositif expérimental utilisé pour l'étude de la vaporisation des gouttes à hautes températures ; © ICARE-CNRS.

## ATOMISATION ET COMBUSTION DES SPRAYS

L'atomisation et la combustion de jets liquides est un axe de recherche très important pour les performances des moteurs fusées cryogéniques (comme le moteur Vulcain du lanceur d'Ariane 5), la propulsion par détonation, les réacteurs aéronautiques ou les moteurs diesel.

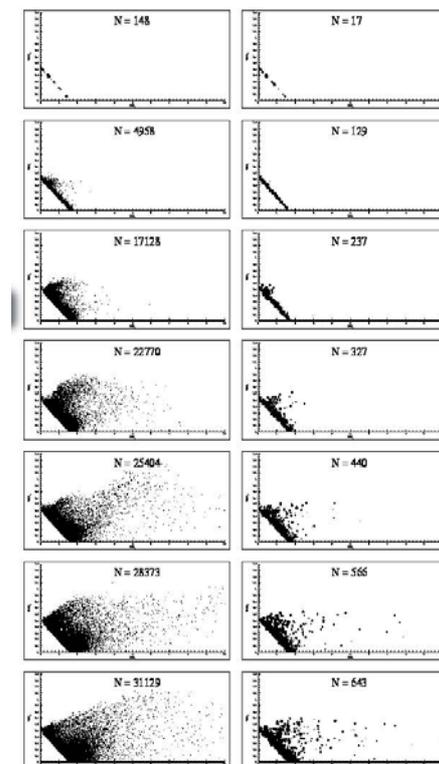
Afin d'optimiser la combustion de ces systèmes de propulsion, ICARE mène des recherches expérimentales et de modélisation et simulation numériques. Elles portent sur l'atomisation de jets liquides d'hydrocarbures ou d'oxygène liquide. L'influence des hautes pressions est notamment recherchée. Différentes configurations d'atomiseurs sont étudiées : atomisation co-axiale pour Vulcain ou systèmes avec pré-vaporisation pour les réacteurs aéronautiques. Dans chaque cas, les phases d'atomisation primaire et secondaire (cassure des gouttes primaires), de vaporisation et de combustion sont étudiées. Des conditions thermodynamiques supercritiques (très haute pression comme dans Vulcain) sont également explorées.

Les résultats expérimentaux obtenus sur ces divers phénomènes ont été modélisés puis incorporés dans les codes (le code THESEE utilisé par la Snecma, le code MSD, développé par l'ONERA, le code commercial Fluent®). Les codes de calcul avec leurs nouveaux modèles validés sont par la suite utilisés pour simuler des expériences de validation, comme celles menées sur le banc MASCOTTE de l'ONERA (atomisation et combustion cryogénique).

Ces études sont menées en collaboration avec le CNES, l'ONERA, la Snecma, MBDA, ESA et ANSYS.

### Contact

Iskender Gökalp ([gokalp@cnrs-orleans.fr](mailto:gokalp@cnrs-orleans.fr))



Simulation numérique de la dynamique de formation du spray : à gauche avec atomisation secondaire, à droite sans atomisation secondaire ; le pas de temps entre chaque image est de 0,264 ms ; N est le nombre total de gouttes dans le domaine de calcul © ICARE-CNRS.

## COMBUSTION TURBULENTE

Les recherches menées sur la combustion turbulente sont extrêmement diversifiées. Elles s'intéressent aux études sur l'interaction entre la turbulence et la combustion (à pression, richesse et mélanges différents) qui caractérisent toutes les applications de la combustion dans divers systèmes de production d'énergie ou de propulsion.

Dans les systèmes dits « prémélangés » comme les turbines à gaz ou les moteurs à combustion interne à allumage commandé, le combustible et l'oxydant sont mélangés avant leur introduction dans la chambre de combustion. Les problèmes de recherche dans ces systèmes concernent aujourd'hui la relation entre la vitesse de combustion (ou le taux de dégagement de la chaleur) et la turbulence dans l'écoulement du prémélange, la stabilité des flammes des mélanges très pauvres en combustible (pour diminuer la température de la flamme et les émissions de CO<sub>2</sub> et des oxydes d'azote), l'influence de l'ajout d'hydrogène dans le mélange, la combustion d'hydrogène pur, la combustion diluée par le CO<sub>2</sub> ou encore la combustion dans l'oxygène pur (pour éliminer l'azote dans les gaz chauds de fin de combustion et faciliter ainsi la capture de CO<sub>2</sub>).

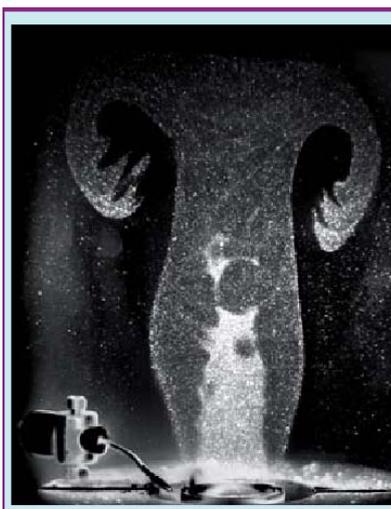
Pour mener ces recherches, ICARE s'est équipé d'une chambre de combustion à haute pression (10 bars). Parmi les diagnostics utilisés, citons la visualisation des flammes par tomographie laser, l'imagerie par diffusion Rayleigh, la mesure de vitesse par anémométrie Doppler et par l'imagerie des particules, toutes ces techniques utilisant la lumière laser et l'imagerie très rapide.

Ces recherches et connaissances servent à améliorer la compréhension des modes de combustion dans les turbines à gaz, par exemple, ainsi qu'à leur adaptation aux nouveaux combustibles et aux nouveaux modes de combustion. Elles sont menées dans le cadre de programmes européens (AFTUR, Hy-TAG), et développées en collaboration avec de nombreux partenaires (Turbomeca, IFP, Siemens, General Electric, Qinetiq, etc.)

### Contacts

Iskender Gökalp, Christian Chauveau

[gokalp@cnr-orleans.fr](mailto:gokalp@cnr-orleans.fr) ; [chauveau@cnr-orleans.fr](mailto:chauveau@cnr-orleans.fr)



De gauche à droite : vue de la chambre de combustion haute pression d'ICARE pour l'étude des flammes turbulentes ; visualisation par tomographie plan laser d'une flamme conique turbulente de prémélange méthane-air ; images instantanées de la même flamme pour deux pressions différentes, 1 bar et 9 bars ; © ICARE-CNRS.

## CINÉTIQUE CHIMIQUE ET STRUCTURE DE FLAMMES À HAUTE PRESSION

Parmi les stratégies actuelles qui cherchent à réduire l'émission de polluants et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère par des moteurs et turbines à gaz, une stratégie efficace consiste à réaliser une combustion dite en « mélange pauvre ». Ce mode de combustion nécessite la maîtrise des instabilités qui peuvent conduire à l'extinction des flammes. L'ajout d'hydrogène est l'une des pistes étudiées à l'ICARE.

Des flammes de méthane-hydrogène-air ( $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-air}$ ) et de monoxyde-de-carbone-hydrogène-air ( $\text{CO-H}_2\text{-Air}$ ) sont étudiées à haute pression, ce qui correspond aux conditions de fonctionnement des installations industrielles.

La concentration des espèces chimiques majoritaires de ces flammes ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , *etc.*), la concentration des espèces radicalaires ( $\text{OH}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}$ ), sont déterminées à l'aide de diagnostics laser (diffusion Raman et Rayleigh ; technique de la fluorescence induite par laser).

L'intensité de combustion de ces flammes, donnée globale de première importance, est déduite des mesures de la vitesse de propagation de la flamme, grâce au diagnostic laser PIV (*Particle Imaging Velocity*).

Toutes ces mesures permettent de caractériser les étapes chimiques du processus de combustion à haute pression, et donc de prédire l'apparition des espèces les plus polluantes.

Ces résultats expérimentaux sont utilisés pour valider des modèles cinétiques de combustion, par la suite exploités dans des codes de calcul afin de prédire le fonctionnement d'installations.

### Contacts

Jean-Louis Delfau, Laure Pillier, Christian Vovelle

[delfau@cnrs-orleans.fr](mailto:delfau@cnrs-orleans.fr) ; [pillier@cnrs-orleans.fr](mailto:pillier@cnrs-orleans.fr) ; [vovelle@cnrs-orleans.fr](mailto:vovelle@cnrs-orleans.fr)



À gauche, vue d'ensemble des brûleurs « jumeaux » à contre-courants montés en vis-à-vis. Ceux-ci sont placés dans une enceinte haute pression, photo de droite, (1-50 bars) et permettent l'étude de deux flammes laminaires de prémélange, identiques ; © ICARE-CNRS/Christian Vovelle.

## ÉTUDE DE FLAMMES LAMINAIRES

Une donnée fondamentale d'un système combustible est sa vitesse de « flamme laminaire », c'est à dire sa vitesse « normale de propagation ou de combustion ». Cette donnée s'avère indispensable pour la modélisation numérique des processus de combustion car elle permet de réduire considérablement les temps de calcul.

Cette vitesse dépend des paramètres thermodynamiques et des réactions chimiques. Elle peut être calculée sur des bases théoriques à partir d'un modèle cinétique détaillé si l'on sait évaluer les propriétés de transport des espèces chimiques présentes dans la zone de réaction de la flamme. Réciproquement, la mesure expérimentale permet de valider ou non le mécanisme réactionnel si les données thermo-cinétiques sont connues.

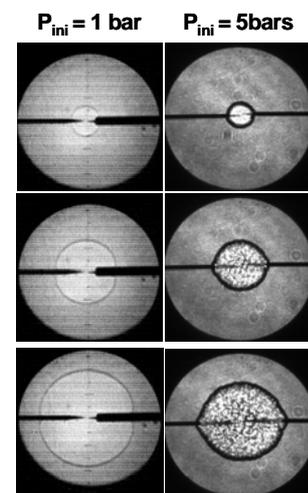
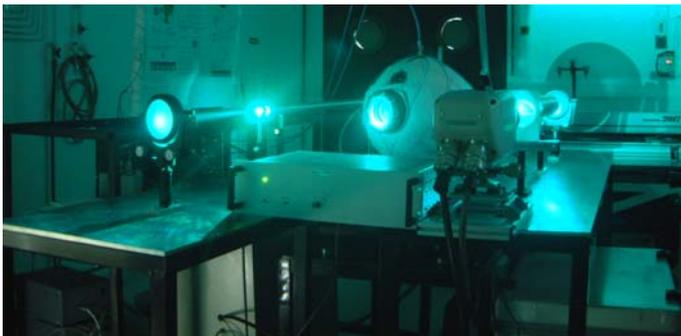
ICARE utilise la méthode expérimentale de la « bombe sphérique » pour déterminer la vitesse de flamme laminaire. Cette méthode a l'avantage d'être précise, rapide et offre une gamme de températures et de pressions initiales très large.

La méthode de la bombe sphérique est associée à la technique de strioscopie laser, qui permet de visualiser la propagation de la flamme, à l'aide d'une caméra rapide (100 000 images/s). Sont aussi mises en évidence les instabilités du front de flamme et sa limite de propagation.

Ces études sont financées par divers groupes industriels, dont TOTAL, PSA-Peugeot-Citroën et des organismes tels que l'IRSN, l'ANR (programme PAN-H/HYDROMEL).

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Nabiha Chaumeix  
[paillard@cnrs-orleans.fr](mailto:paillard@cnrs-orleans.fr) ; [chaumeix@cnrs-orleans.fr](mailto:chaumeix@cnrs-orleans.fr)



À gauche : bombe sphérique et dispositif de visualisation associé. Images de droite : propagation d'une flamme dans le cas d'un mélange contenant 30 % d'hydrogène dans l'air ; observation des plissements de la flamme à pression élevée ; © ICARE-CNRS.

## FORMATION DE POLLUANTS À PARTIR DE MÉLANGES REPRÉSENTATIFS D'ESSENCES

L'accumulation d'émissions polluantes dues aux combustions (en particulier, celles des véhicules à moteur) incite les instances gouvernementales des pays occidentaux à prendre des mesures pour limiter leurs effets néfastes sur l'environnement. Les industries automobiles et pétrolières sont les premières concernées par l'établissement de nouvelles normes antipollution. La réduction des émissions polluantes issues des moteurs à essence ou diesel peut être assurée par le traitement des gaz brûlés, ainsi que par l'élimination des constituants des carburants nocifs pour l'atmosphère (composés phénoliques, hydrocarbures aromatiques polycycliques, benzaldéhydes, *etc.*).

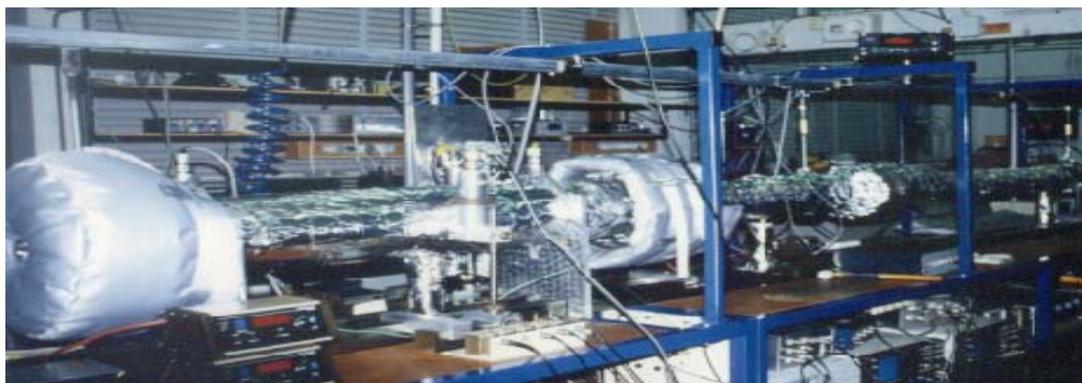
Les études menées à l'ICARE consistent à établir des modèles cinétiques détaillés de l'oxydation de mélanges de molécules. Celles-ci sont représentatives des grandes familles chimiques que l'on trouve dans les essences.

La technique du tube à choc associée à diverses méthodes d'analyses spectroscopiques permet de suivre l'évolution de la réaction chimique proche des conditions réelles dans les moteurs automobiles. Les informations obtenues permettent d'enrichir et d'améliorer les modèles cinétiques à hautes températures (plus de 1 000 K). À plus long terme, ces données permettront de mettre au point le moteur HCCI (moteur à charge homogène et allumage par compression)

Ces études se déroulent dans le cadre d'une action soutenue par le Pôle national à implantation régionale (PNIR) Carburants et moteurs et des industriels tels que TOTAL et PSA Peugeot Citroën.

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Nabiha Chaumeix  
[paillard@cnrs-orleans.fr](mailto:paillard@cnrs-orleans.fr) ; [chaumeix@cnrs-orleans.fr](mailto:chaumeix@cnrs-orleans.fr)



Vue d'ensemble du tube à choc utilisé pour l'oxydation des hydrocarbures à haute température ; © ICARE-CNRS.

## FORMATION DE PARTICULES DE SUIES DANS LES CARBURANTS

La combustion incomplète des carburants commerciaux (essence, kérosène, gazole) est responsable de la formation de particules de suie, polluant le moins bien connu à ce jour.

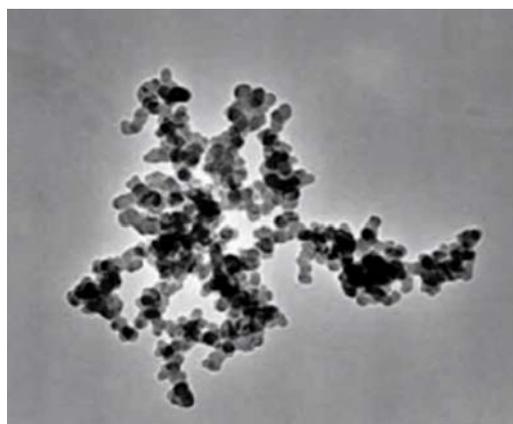
Afin de reproduire et d'étudier la formation de ces suies dans les moteurs automobiles, ICARE utilise la technique de tube à choc. Par cette technique, le gaz étudié est porté « instantanément » à des conditions de température et de pression similaires à celles du fonctionnement d'un moteur, afin d'analyser la cinétique réactionnelle. Ce procédé est associé à une technique optique d'extinction laser qui permet de détecter et suivre les particules de suie (depuis leur nucléation jusqu'à la fin de leur croissance).

Les particules de suie sont caractérisées par microscopie électronique à transmission (MET). À ces études expérimentales sont associées des études portant sur les modèles cinétiques détaillés de la formation des suies, études menées en collaboration avec l'Université de Toronto.

De grands groupes industriels (TOTAL, PSA-Peugeot, Citroën) et la communauté européenne (Programme Soot in Aeronautics) financent ces recherches. Les travaux en cours consistent à étudier la formation de la fraction organique soluble adsorbée sur les suies.

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Nabiha Chaumeix  
[paillard@cnrs-orleans.fr](mailto:paillard@cnrs-orleans.fr) ; [chaumeix@cnrs-orleans.fr](mailto:chaumeix@cnrs-orleans.fr)



Cliché de microscopie électronique à transmission montrant un agrégat de particules de suies formées à partir de la pyrolyse du toluène par la méthode du tube à choc ; © ICARE-CNRS.

---

<sup>1</sup> Formation du noyau à partir d'une phase gazeuse

## THERMOCHIMIE DES ESTERS D'HUILES VÉGÉTALES

Dans le contexte des émissions de gaz à effet de serre du fait de l'utilisation massive des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), les énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse) sont devenues de réelles alternatives énergétiques.

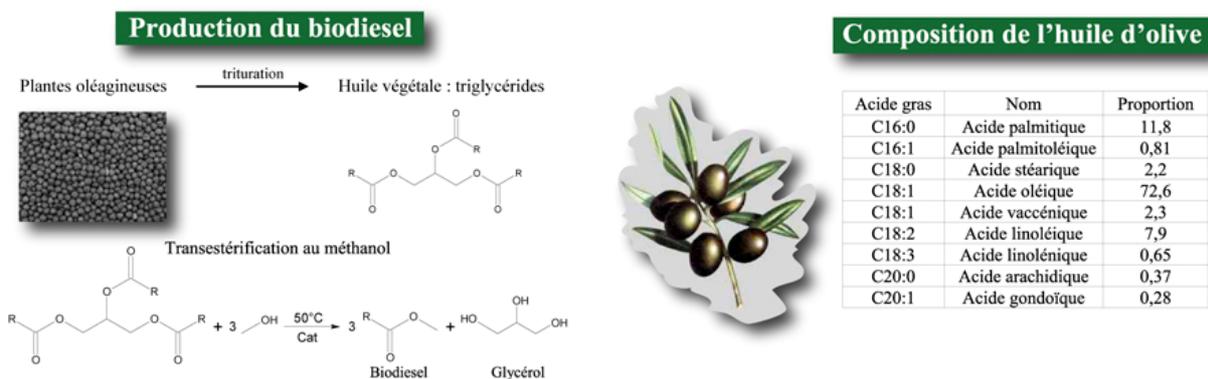
ICARE se concentre tout particulièrement sur l'étude des biocarburants, en l'occurrence les esters d'huiles végétales (issues des plantes oléagineuses telles le colza, le soja ou le tournesol). Ces biocarburants offrent comme avantages de permettre un approvisionnement sûr (nouveaux débouchés pour l'agriculture et le tissu économique local), et surtout une réduction notable des émissions polluantes qui concourent à l'effet de serre.

Le développement d'un modèle de cinétique détaillé est nécessaire pour analyser et prédire la combustion des biocarburants. Celui-ci nécessite à son tour la connaissance des grandeurs thermodynamiques (quantité de chaleur dégagée lors de formation et de combustion, coefficients calorifiques) des espèces impliquées, aujourd'hui très mal connues. Ces paramètres sont estimés à ICARE en se référant à la chimie théorique et en mettant en œuvre la méthodologie dite *ab initio* (sans connaissances pré-conçues. Elle offre le meilleur compromis entre précision des résultats et temps de calcul sur ordinateur. Cette approche a été validée avec succès pour 655 molécules et espèces radicalaires. Rapide et fiable, la méthode a permis d'estimer les données thermodynamiques manquantes des molécules à longues chaînes (à nombre d'atomes de carbone important), comme les huiles végétales et leurs esters.

### Contact

Laurent Catoire

[catoire@cnr-orleans.fr](mailto:catoire@cnr-orleans.fr)



Vue détaillée de la production de biodiesel et composition de l'huile d'olive ; © ICARE-CNRS

## CINÉTIQUE DE LA COMBUSTION DU « BIODIESEL »

Le gazole est un carburant utilisé dans les moteurs Diesel. L'ajout d'esters méthyliques d'huiles végétales permet de limiter la contribution de ce mode de combustion à l'effet de serre et de réduire la formation de particules de suie par introduction d'oxygène contenu dans les huiles végétales.

Dans le but de fournir aux motoristes des modèles de cinétique de combustion capables de simuler les processus qui régissent la combustion de ces nouveaux carburants ou de ces additifs, des études expérimentales et des modélisations cinétiques sont menées à ICARE.

Du point de vue expérimental, la cinétique de combustion de l'ester méthylique de colza est étudiée grâce à un réacteur auto-agité par jets gazeux dans un large domaine de températures (1 à 10 atmosphères) et de richesses (de 0,25 à 1,5) et plusieurs techniques de mesure pour déterminer les concentrations des espèces comme la chromatographie en phase gazeuse. Quant aux modélisations menées sur les réactions chimiques, elles ont permis de développer un modèle cinétique qui contient 255 espèces et 1 841 réactions réversibles, calculées en fonction de la pression.

Le bon accord entre les expériences et les calculs sont prometteurs quant à la simulation de la combustion des biocarburants. Ces résultats permettront d'accélérer l'adaptation des moteurs qui utiliseront ces biofuels.

### Contact

Philippe Dagaut

[dagaut@cns-orleans.fr](mailto:dagaut@cns-orleans.fr)



Réacteur auto-agité par jets gazeux, en silice fondue, utilisé pour mener les études expérimentales sur la cinétique chimique de la combustion © ICARE-CNRS.

## RÉACTIVITÉ ATMOSPHÉRIQUE

L'utilisation des ressources fossiles et de la biomasse qui soutiennent les activités humaines (industries, transports) conduit à l'émission excessive de polluants qui ont un impact avéré sur le changement climatique. Ces gaz modifient la composition chimique de l'atmosphère, contribuent à l'effet de serre et affectent la qualité de l'air.

Les études menées à ICARE sur la réactivité atmosphérique consistent à déterminer les mécanismes réactionnels chimiques contrôlant les changements de la composition atmosphérique.

Les réactions qui se déroulent dans l'atmosphère terrestre sont reproduites dans des chambres de simulation atmosphérique et aussi à l'aide de réacteurs pour l'étude de la réactivité chimique. À cet ensemble s'ajoute plusieurs appareils d'analyse des espèces gazeuses et particulaires (spectromètres de masse, chromatographes, spectromètres infrarouge, compteur de particules, *etc.*).

Le « devenir atmosphérique » de composés organiques volatils (COV) et semi-volatils, de composés oxygénés (carburants, solvants), de composés phosphorés (pesticides), d'alcools perfluorés (traitement de surface), est ainsi étudié.

Les résultats de ces recherches contribuent, par exemple, à évaluer le rôle des COV dans la pollution par les photooxydants (ozone, NO<sub>2</sub>,...) ou les particules et l'effet des suies sur les concentrations de ces oxydants. Ils contribuent également à évaluer l'oxydation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) contenues dans les suies ; les produits d'oxydation des HAP peuvent être dans certains cas plus toxiques que les HAP eux-mêmes. Les études menées à ICARE visent également à mieux comprendre la chimie qui se produit aux basses températures (jusqu'à -70°C) qui caractérisent les couches atmosphériques situées entre 8 et 20 km et qui contiennent des polluants émis par l'aviation ou transportés depuis la surface terrestre.

Ces recherches sont soutenues par divers programmes de la Commission Européenne, de l'INSU-CNRS et du Ministère de l'Ecologie.

### Contacts

Youri Bedjanian, Nadia Butkoskaya, Véronique Daele,  
Georges Le Bras et Abdelwahid Mellouki

[bedjanian@cnr-orleans.fr](mailto:bedjanian@cnr-orleans.fr) ; [bout@cnr-orleans.fr](mailto:bout@cnr-orleans.fr) ; [daeale@cnr-orleans.fr](mailto:daeale@cnr-orleans.fr) ;  
[lebras@cnr-orleans.fr](mailto:lebras@cnr-orleans.fr) ; [mellouki@cnr-orleans.fr](mailto:mellouki@cnr-orleans.fr)



À gauche, vue d'ensemble de la chambre de simulation atmosphérique (d'un volume de 8 m<sup>3</sup>) ; à droite, réacteur à écoulement et spectromètre de masse ; © ICARE-CNRS.

## MÉTHODES D'ESTIMATION DE POINTS-ECLAIRS ET DE LIMITES INFÉRIEURES D'INFLAMMABILITÉ

Les « points-éclairs »<sup>1</sup> et les limites inférieures d'inflammabilité sont des données importantes pour la manipulation, le stockage et le transport des produits chimiques et donc pour la gestion des risques chimiques.

Les méthodes d'estimations de ces paramètres d'inflammabilité sont peu fiables, souvent spécifiques à une famille chimique. De plus, les données disponibles manquent pour de nombreuses substances, dont certains hydrocarbures. Il a même été montré que les fiches de sécurité de produits chimiques étaient erronées (mauvaises conversions °F/°C, erreurs de mesure, produits contenant des impuretés, erreurs typographiques, *etc.*) Les limites inférieures d'inflammabilité (LII) sont des données figurant sur les fiches de sécurité.

Les études expérimentales sur la détermination des points-éclairs menées à l'ICARE ont été réalisées avec le soutien de l'Air Liquide. Elles montrent que les fiches de sécurité gérées par l'Union européenne et l'ONU (International Chemical Safety Cards ou ICSCs) contiennent de nombreuses imprécisions, voire quelques erreurs.

On considère ces données, souvent à tort, comme étant mesurées dans l'air, à 25°C et à pression atmosphérique. Or de nombreux procédés industriels sont réalisés à haute température et il est donc nécessaire de préciser sur les fiches et notices les conditions initiales de ces LII.

À l'heure actuelle, il n'existe que quelques méthodes, la plupart du temps non validées, pour estimer une LII à 25°C et sa dépendance envers la température. Les études menées à l'ICARE sur cette thématique ont permis d'établir et de valider des méthodes empiriques simples permettant des estimations fiables des points-éclairs et de la dépendance en température des LII. Ces méthodes initialement établies pour des composés purs ont été étendues avec succès aux cas de mélanges binaires. Ainsi il a été possible de prévoir les MFPBs (Minimum Flash Point Behaviors) de certains mélanges liquides tels éthanol/n-octane par exemple. Ces cas de MFPBs, pour lesquels le point-éclair d'un mélange binaire est nettement inférieur aux points-éclairs des deux constituants purs, représentent des situations pour lesquelles les risques sont généralement mal évalués.

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Laurent Catoire  
[paillard@cnr-orleans.fr](mailto:paillard@cnr-orleans.fr) ; [catoire@cnr-orleans.fr](mailto:catoire@cnr-orleans.fr)

---

<sup>1</sup> Les « points-éclairs » correspondent au moment où l'ensemble des conditions sont réunies pour que le gaz de combustion s'enflamme.

## ACCÉLÉRATION DE FLAMME EN PRÉSENCE D'OBSTACLES RÉPÉTÉS

La combustion est le mode de conversion de l'énergie le plus utilisé dans le monde. Mais une flamme qui se propage dans un milieu confiné peut être à l'origine de catastrophes, tant en milieux domestique qu'industriel.

Une flamme qui se propage peut le faire dans un mode lent (mode de « déflagration »), avec une vitesse de flamme de l'ordre du m/s, ou rapide (mode de « détonation »), avec une vitesse de deux à trois km/s. Une flamme qui rencontre un obstacle dans sa propagation augmente notablement sa vitesse. Dans ce cas, la flamme s'accompagne de fortes variations de pression à même d'endommager les structures environnantes.

Les études menées à l'ICARE consistent en l'analyse fine des conditions de propagation d'une flamme dans une enceinte fermée, munie ou non d'obstacles. L'installation, hautement instrumentée, permet de préciser les conditions d'accélération de flamme afin d'élaborer des critères de limites de vitesse de flamme fortement accélérée (deux fois la vitesse du son dans les gaz brûlés) sans pouvoir atteindre le régime de détonation. Le rôle des obstacles est pris en considération, ainsi que ceux du point d'allumage et des gradients de concentration.

Ces expériences permettent d'améliorer les codes de simulation d'explosions liées au risque hydrogène dans les centrales nucléaires. Elles sont aussi développées afin de prendre en compte l'analyse des risques dans le cas de l'extension de la consommation de l'hydrogène ajouté au gaz naturel dans les réseaux de distribution.

Ces études sont financées par l'IRSN et AREVA. Elles sont soutenues par l'ANR dans le cadre du programme PAN-H (HYDROMEL) en association avec GDF, l'AIR LIQUIDE, l'INERIS et le CEA.

### Contacts

Claude-Étienne Paillard, Nabiha Chaumeix  
[paillard@cnrs-orleans.fr](mailto:paillard@cnrs-orleans.fr) ; [chaumeix@cnrs-orleans.fr](mailto:chaumeix@cnrs-orleans.fr)



Enceinte d'accélération de flamme ; © ICARE-CNRS.

## ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR LA STABILITÉ D'UNE FLAMME DE DIFFUSION LAMINAIRE

L'effet d'un champ magnétique de forte intensité sur une flamme modifie la forme de celle-ci par une action sur la convection de l'air (à cause du caractère paramagnétique de l'oxygène), ce qui permet de contrôler le mélange et donc la combustion. En effet, des dispositifs magnétiques équipent déjà des systèmes de combustion industriels. Ils permettent d'améliorer le rendement et de limiter l'émission de gaz polluants et de CO<sub>2</sub>.

Dans le contexte des recherches sur l'efficacité énergétique et la maîtrise de la pollution, ICARE mène des études sur l'effet d'un champ magnétique sur la combustion d'un mélange méthane-air.

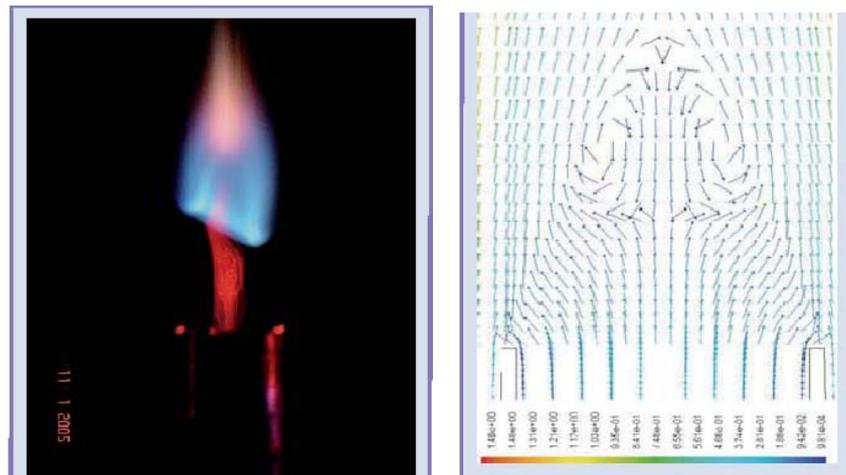
Le champ magnétique est créé à l'aide d'un aimant permanent, dont l'intensité est de 600 mT (milli-Tesla). Une flamme de diffusion de méthane dans un écoulement annulaire d'air est créée entre les deux bobines de l'aimant à l'aide d'un brûleur cylindrique. Le diagnostic utilisé pour visualiser et caractériser la dynamique de la flamme consiste en l'imagerie par plan laser. En complément aux études expérimentales sont menés des calculs numériques (à l'aide du code *Fluent*<sup>®</sup>). Le but est d'introduire un modèle du champ magnétique dans les équations de Navier-Stokes, qui décrivent les écoulements de fluide.

Ces recherches sont mises en œuvre dans le cadre d'un projet européen (INTAS) sur la combustion assistée par plasma et/ou par champ magnétique.

### Contacts

Pascale Gillon, Brahim Sarh

[gillon@cns-orleans.fr](mailto:gillon@cns-orleans.fr) ; [sarh@cns-orleans.fr](mailto:sarh@cns-orleans.fr)



Visualisation et simulation numérique d'une flamme de diffusion décollée de méthane-air. Le rôle du champ magnétique recherché est de coller la flamme au brûleur en améliorant le mélange à sa base © ICARE-CNRS.

## COMBUSTION ASSISTEE PAR PLASMA

Les exigences des utilisateurs et les préoccupations de santé publique conduisent à un durcissement inéluctable des normes tolérables pour les émissions polluantes des systèmes de combustion. Les méthodes utilisées à ce jour, basées sur l'obtention d'un mélange plus homogène entre l'air et le carburant, sur un meilleur réglage du point de fonctionnement dans la chambre de combustion ou sur une dépollution catalytique ultérieure, sont efficaces mais ne peuvent résoudre à elles seules ce problème car les limites de ces procédés sont presque atteintes.

Le but fondamental de ce projet est de développer une approche nouvelle de la physico-chimie de la combustion en associant la physique des plasmas et la chimie de la combustion. L'étude faite à ICARE porte sur l'influence de la molécule d'oxygène excitée par décharges électriques sur l'allumage de la combustion et sur les évolutions des espèces chimiques formées durant la combustion. Cette combustion activée ou assistée ouvre des possibilités importantes sur l'efficacité de la combustion (y compris supersonique) associée à une réduction des émissions d'espèces polluantes.



*Flamme de diffusion à contre courant en présence d'espèces excitées de l'oxygène*



*Une flamme alimentée avec de l'oxygène excité (à droite) produit moins de suie (visualisée par la fluorescence rosée) qu'une flamme alimentée par de l'oxygène non excité (à gauche).*

Cette étude est soutenue par la Commission Européenne (Programme INTAS et Young Scientist Fellowships), la région Centre en association avec le Land de Saxe-Anhalt (thèse en cotutelle Université d'Orléans et Université Otto von Guericke, Magdeburg)

### Contact

Jean-Pierre Martin

[jean-pierre.martin@cnsr-orleans.fr](mailto:jean-pierre.martin@cnsr-orleans.fr)

## **Département des Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie (ST2I)**

### ➤ **Sa philosophie**

La fusion du département des Sciences pour l'ingénieur et du département des Sciences et technologies de l'information et de la communication a donné naissance au département des Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie. Ses caractéristiques d'ouverture sont l'une de ses richesses : ouverture vers les autres disciplines, ouverture vers le secteur industriel, ouverture vers la société... Il en constitue une interface privilégiée.

### ➤ **Ses objectifs**

Ses objectifs premiers sont de construire une démarche scientifique centrée sur la production des savoirs et centrée sur l'homme - l'homme et ses besoins, l'homme et sa santé, l'homme et ses produits - et par conséquent de développer une approche systémique pour concevoir, produire et exploiter des systèmes plus sûrs, plus communicants, plus économes, plus performants, plus respectueux de l'environnement.

Ces objectifs s'inscrivent dans la stratégie du CNRS : développer des concepts et des technologies de base ; être présent sur le front de la connaissance et faire émerger de nouveaux sujets ; répondre aux grands défis de la société.

### ➤ **Ses principaux thèmes de recherche**

Les communications, la sécurité et la sûreté des systèmes matériels et logiciels, les systèmes mécaniques, l'énergie, l'ingénierie pour le vivant... Le département vise des ruptures en sciences et technologies de l'information et en sciences et technologies pour l'ingénierie. Pour atteindre ces objectifs, le Département veut accroître la mise en synergie des disciplines tout en les confortant :

Informatique, automatique et robotique, signal et communication ; micro et nanotechnologies, électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique ; Ingénierie des matériaux et des structures, mécanique des solides, acoustique, biomécanique, biomatériaux ; mécanique des milieux fluides et réactifs hétérogènes ; caractérisation, propriétés de transfert, procédés de transformation...

Il veut également adopter une démarche commune pour comprendre : modéliser et observer par la simulation intensive, l'expérience ; pour concevoir et construire : spécifier en partant du besoin exprimé et en remontant les spécifications jusqu'au composant et au système ; pour maîtriser, optimiser et gérer la complexité liée à la mobilité, aux grandes masses de données, aux réseaux : Energie, Vivant, Sciences humaines et sociales ; pour générer de nouvelles applications.

### ➤ **Une politique d'interdisciplinarité**

Les problèmes que rencontrent la science et la société sont devenus complexes et ne peuvent être résolus que par une convergence de méthodes et de concepts.

L'interdisciplinarité est réaffirmée comme l'élément essentiel de la politique scientifique du département ST2I. Les interfaces de ST2I avec les autres départements du CNRS sont nombreuses, notamment avec MPPU, SHS, SdV, et SC. Il en est de même avec les autres organismes comme le CEA, l'INRIA et l'INSERM...

➤ ***Une politique de partenariat et de valorisation***

Le département ST2I mène une politique volontariste de partenariat avec les milieux socio-économiques et de valorisation de la recherche. Les recherches ST2I trouvent en effet leurs applications dans de nombreux secteurs d'activité : énergie, transports (terrestres, aériens, spatiaux), télécommunications, électronique, information, santé

A l'écoute des besoins industriels, ses laboratoires apportent des réponses aux problèmes posés par les entreprises en s'appuyant sur une recherche amont de qualité. Les partenariats avec d'autres organismes sont également encouragés afin d'accroître l'interdisciplinarité et la complémentarité des compétences ainsi qu'avec les universités, les Écoles.

Le département ST2I renforce la capacité d'innovation de ses personnels et soutient leurs actions de valorisation : dépôt de brevets, de logiciels et de soutien au transfert technologique et facilite la création d'entreprises exploitant les innovations de ses laboratoires

➤ ***Une politique d'ouverture à l'international***

Le département ST2I développe une intense activité de collaboration de recherche scientifique sur le plan international impliquant plus de 20 pays de tous les continents. Ces collaborations se présentent sous diverses formes : de l'Unité Mixte Internationale implantée en France ou à l'étranger et accueillant du personnel du CNRS et du pays partenaire, au simple échange de chercheurs.

On peut compter actuellement :

- 4 Unités Mixtes Internationales
- 8 Laboratoires Internationaux Associés
- 2 Groupements de Recherche Internationaux
- 22 Projets internationaux de Coopération Scientifique.

Ces collaborations se traduisent par de nombreuses co-publications dans des revues de prestige, des participations à des conférences internationales de haut niveau et la réalisation de plates-formes scientifiques.

De nouvelles UMI sont en phase de création. Le département ST2I a la volonté de développer des collaborations ciblées sur l'Asie et l'Amérique Latine.

➤ ***Une politique d'ouverture à l'Europe***

Il déploie par ailleurs une politique d'ouverture vers l'Europe :

- 8 Groupements de Recherche Européens
- 4 Laboratoires Européens Associés
- 27 projets internationaux de coopération scientifique
- Création d'UMI européennes.

➤ ***ST2I en chiffres***

Chercheurs CNRS : 1461

Enseignants chercheurs : 6728

Chercheurs non CNRS : 291

Doctorants et post doctorants : 8016

ITA CNRS : 1388

ITA universités et autres : 1795

Structures de recherche et de service rattachées à titre principal : 227

Budget hors personnels et hors contrats : 28,390 M€

<http://www.cnrs.fr/st2i/>