

# CENTRE CEA DE SACLAY LE JOURNAL



énergie atomique • énergies alternatives

**TECHNOLOGIE PAGE 10**

Des images  
pour sécuriser  
ou s'orienter

**CHIMIE PAGE 12**

Des indices  
sur l'origine de la vie

**CONFÉRENCE CYCLOPE PAGE 16**

Les émerveillements  
d'un théoricien

**L'INSTITUT DE PHYSIQUE THÉORIQUE**

Au carrefour de la

**physique et des  
mathématiques**

L'attracteur de Lorenz montre comment les différentes variables d'un système dynamique évoluent au cours du temps sur une trajectoire non périodique.

© CNRS PHOTOTHÈQUE / CNET / LACTAMME / COLONNA JEAN-FRANÇOIS

# édito

Depuis son origine, le CEA a joué un rôle important dans le développement de nouvelles disciplines scientifiques, en particulier en physique théorique. Des physiciens théoriciens saclayens ont été pionniers dans plusieurs spécialités tandis que d'autres connaissent un rayonnement international à travers leurs enseignements, devenus des « standards ». L'Institut de Physique Théorique du CEA est, avec d'autres équipes, à l'origine d'une communauté de recherche de très grande qualité. Cette communauté est particulièrement bien représentée sur le plateau de Saclay, avec notamment le Centre de physique théorique (École polytechnique, CNRS), le Laboratoire de physique théorique d'Orsay et le Laboratoire de physique théorique et de modèles statistiques (Université Paris-Sud 11, CNRS).

## “ 2011 SERA RICHE EN CÉLÉBRATIONS DE LA SCIENCE ”

Le dossier de ce numéro du journal de Saclay doit permettre au profane de se forger une représentation un peu plus précise de cette discipline très abstraite, au carrefour de la physique et des mathématiques, et qui connaît de plus en plus de développements dans beaucoup d'autres domaines dont la biologie.

Cette année 2011 sera riche en anniversaires et célébrations de la science. Nous fêterons tour à tour le centenaire de la découverte de la supraconductivité ainsi que celle du noyau de l'atome. Enfin, l'Année internationale de la chimie, qui coïncide avec le centenaire du Prix Nobel de chimie décerné à Marie Curie, sera l'occasion de revisiter tous les apports de la chimie à nos modes de vie. Nous reviendrons sur ces thèmes tout au long de cette année.



*Y. Caristan*  
**Yves Caristan,**  
Directeur du centre CEA  
de Saclay

Henri Orland, directeur de l'Institut de Physique Théorique de Saclay (IPhT) évoque cette discipline difficile, exigeante, très proche des mathématiques. Il brosse le portrait du groupe prestigieux auquel il appartient.

# Au carrefour de la physique et des





« Le physicien théoricien s'attache à comprendre l'essence des phénomènes physiques. »

HENRI ORLAND



Henri Orland, directeur de l'Institut de Physique Théorique de Saclay.

# mathématiques



Les collaborations de l'IPHT se comptent par centaines. Souvent, les chercheurs travaillent par petites équipes.

## Journal de Saclay : Comment définiriez-vous la physique théorique ?

**Henri Orland :** La physique s'attache à comprendre les phénomènes naturels, essentiellement à travers des observations expérimentales. La compréhension profonde des mécanismes passe nécessairement par un formalisme mathématique, qui seul, permet de prédire des faits expérimentaux.

La physique théorique consiste à construire et à étudier des modèles, et ainsi être capable de faire des prédictions en accord avec l'expérience. Le modèle est d'autant plus « ressemblant » et facile à résoudre que l'objet qu'il décrit est simple. Tel est le cas par exemple de l'atome d'hydrogène pour lequel on peut écrire un modèle simple dont la résolution exacte fournit des prédictions détaillées très précises. Beaucoup plus complexes sont les objets macroscopiques, tels qu'un liquide, qui comptent quelque  $10^{23}$  particules (1 suivi de 23 zéros). Il est impossible de résoudre un modèle mettant en jeu de tels nombres sans passer par un traitement mathématique puissant de ces données, et dans de nombreux cas, par un calcul numérique sur ordinateur.

Le rôle du physicien théoricien consiste donc à comprendre l'essence des phénomènes physiques et ainsi à construire des modèles aussi simples que possible. Il faut évidemment s'assurer que les modèles simplifiés contiennent bien la physique du phénomène que l'on cherche à comprendre. Ces modèles schématiques sont ensuite formulés en termes d'équations mathématiques que l'on essaie de résoudre au mieux. Dans certains domaines, comme en physique atomique, il n'y a pas réellement de distinction entre expérimentateurs



## « Nous osons manipuler des objets mathématiques parfois mal définis. »

et théoriciens. Ce n'est pas le cas en physique des particules, pour laquelle il existe un besoin théorique criant. La physique des collisions qui se produiront au CERN, dans le LHC<sup>1</sup>, apportera des surprises qui sortiront certainement du cadre de la théorie actuelle, appelée modèle standard. En effet, il y a de bonnes raisons théoriques de penser qu'à ces niveaux d'énergie, encore jamais atteints, le modèle standard sera insuffisant. Il faudra donc, pour lever le voile sur cette nouvelle physique, « soustraire » en quelque sorte la physique connue aujourd'hui, ainsi que les mécanismes parasites gênants (ou bruit de fond). Ce genre de travail, crucial pour la compréhension de la nouvelle physique au LHC, est pris en charge par certains théoriciens de l'IPhT.

### JdS : Quels sont les domaines d'étude de l'IPhT ?

**Henri Orland :** Nos domaines d'étude sont bien représentatifs de la physique théorique en général. Nous sommes organisés en trois groupes thématiques. Le premier concerne la physique mathématique, le deuxième la phy-

sique des particules, l'astrophysique et la cosmologie. Le troisième est axé sur la physique statistique et l'étude de la matière condensée.

### JdS : À quoi ressemble la physique mathématique ?

**Henri Orland :** Il est bien question de mathématiques « pures », mais motivées par la physique. Ainsi par exemple, des liens entre la théorie des cordes<sup>2</sup> (physique) et des développements en géométrie algébrique (mathématiques) ont été établis. Ceci est un exemple de ce que fait la physique mathématique.

Les physiciens théoriciens ont cette sorte d'audace de manipuler des objets mathématiques parfois mal définis grâce auxquels ils sont capables de réaliser des calculs décrivant des systèmes physiques. Ce sont des « défricheurs » de résultats mathématiques qui souvent ne seront prouvés rigoureusement que dans un deuxième temps, par des mathématiciens, avec les méthodes qui leur sont propres.

Les travaux de Stanislas Smirnov et ceux de Wendelin Werner, qui leur ont valu la médaille Fields respectivement en 2010 et 2006, entrent

dans cette dernière catégorie. L'histoire avait commencé dans les années 1980 avec la mise en évidence de l'importance d'une symétrie mathématique, l'invariance conforme. Les chercheurs de l'IPhT se sont particulièrement illustrés dans le développement des théories de champ conformes. Celles-ci se sont révélées fécondes au point qu'elles leur ont permis de calculer de manière exacte les propriétés de nombreux systèmes physiques à deux dimensions au voisinage d'un changement d'état (point critique vapeur, liquide, solide). Ces résultats ont constitué une découverte majeure des années 1980-1990, et ont été appliqués notamment au graphène (feuillet de carbone).

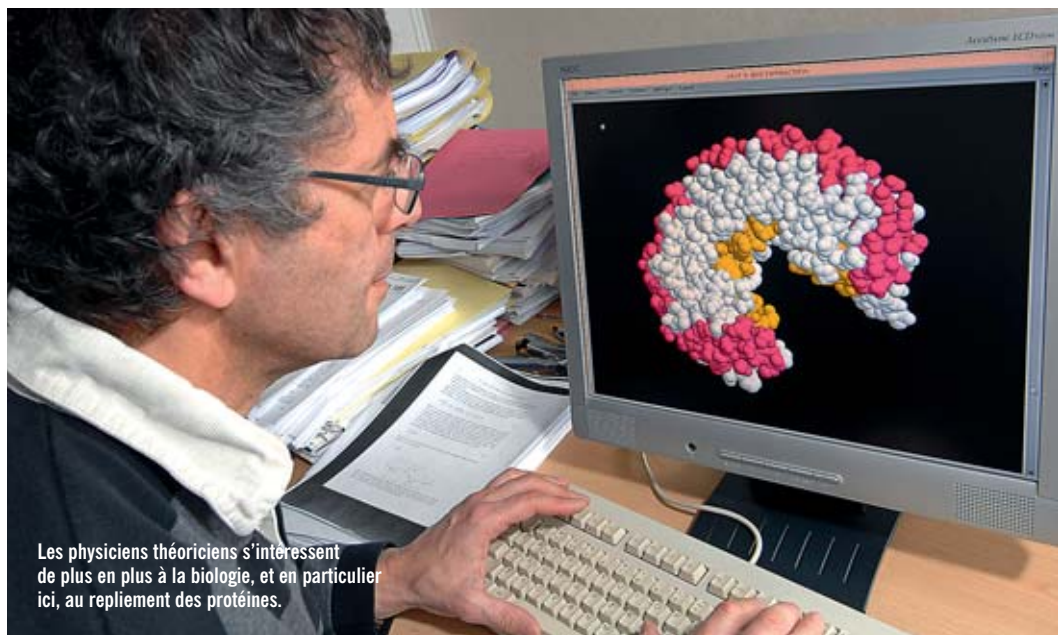
### JdS : Pourquoi la physique des particules, l'astrophysique et la cosmologie sont-elles regroupées ?

**Henri Orland :** Depuis 10 - 20 ans, on assiste à la convergence entre les « deux infinis », c'est-à-dire entre la cosmologie et la physique des particules. En effet, durant et juste après le Big Bang, les quatre interactions fondamentales (gravitationnelle, électromagnétique, forte et



Les surfaces dites de Riemann sont utilisées pour résoudre de nombreux problèmes comme ceux de la théorie des cordes (théorie unificatrice de la physique).

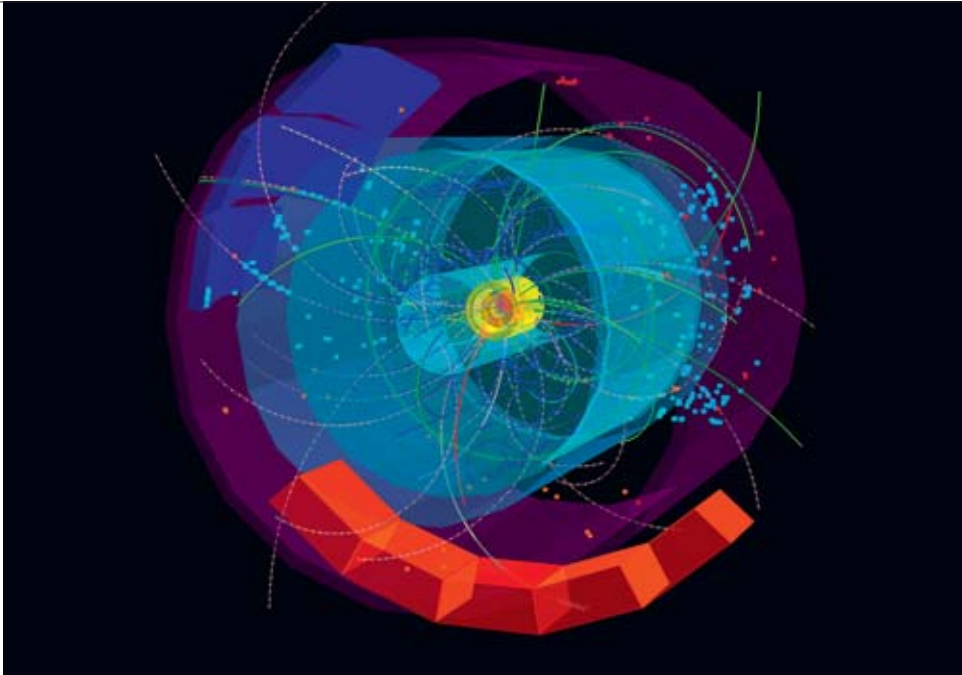
© CEA



Les physiciens théoriciens s'intéressent de plus en plus à la biologie, et en particulier ici, au repliement des protéines.

© L. GODART / CEA





Les grandes expériences de physique des particules en préparation au CERN feront progresser la physique théorique.

## La physique théorique au CEA

Avant même la création en 1963 du Service de physique théorique (SPhT), cette discipline était présente au sein du Service de physique mathématique, chargé de modéliser et de dimensionner les « piles » du CEA, c'est-à-dire ses réacteurs nucléaires expérimentaux. Elle s'est ensuite développée et rapidement diversifiée au-delà de la physique nucléaire : supraconductivité, physique des particules, etc. Aujourd'hui, l'IPhT est un grand laboratoire de physique théorique.

Son effectif, important, comprend notamment une cinquantaine de physiciens permanents issus du CEA pour les deux tiers et du CNRS et à peu près autant de doctorants et de post-doctorants. L'IPhT se situe au meilleur niveau mondial, aux côtés de l'Université d'Oxford, du MIT (Massachusetts Institute of Technology, à Boston), du Laboratoire national de Los Alamos (aux États-Unis) et de l'École normale supérieure de la rue d'Ulm. Les collaborations de l'IPhT se comptent par centaines, au CEA et un peu partout dans le monde. Il s'agit le plus souvent de petites équipes qui cosignent des articles à 2 ou 3 auteurs.

En physique des particules, l'IPhT collabore avec de grosses structures comme le CERN et le Fermilab\*.

Henri Orland, directeur de l'IPhT de 2004 à début 2011, sera remplacé à ce poste par Michel Bauer.

\* Le Fermi National Accelerator Laboratory, près de Chicago aux États-Unis est spécialisé dans la physique des particules des hautes énergies.

faible) ont joué un rôle capital et les particules sont apparues. On observe encore aujourd'hui, grâce aux moyens d'observation sophistiqués dont on dispose, des traces de cette histoire primordiale de l'Univers. Un nouveau domaine, celui des « astroparticules », est apparu avec la découverte d'accélérateurs de particules « naturels » que sont certaines étoiles et galaxies. Ces objets astrophysiques sont en effet capables de communiquer des quantités d'énergie colossales à de la matière éjectée par certaines étoiles en fin de vie par exemple. À l'autre extrémité de l'échelle d'espace, la nouvelle physique que dévoilera le LHC, au CERN, permettra de préciser la nature de la matière et de l'énergie noires, soit près de 95 % du contenu de l'Univers. Autre point fort de ce groupe, la « chromodynamique quantique », nommée ainsi par référence aux « couleurs<sup>3</sup> » des quarks qui constituent les protons et les neutrons, décrit une des quatre forces fondamentales, l'interaction dite « forte », qui lie les composants ultimes du noyau atomique. Paradoxalement, dans ce domaine, plus l'énergie du système étudié est élevée, plus l'interaction dite forte est « faible » et plus les calculs sont « simples » !

### JdS : Comment résumer les thématiques du groupe de physique statistique et d'étude de la matière condensée ?

**Henri Orland :** L'objet de la physique statistique est de comprendre les propriétés macroscopiques d'un système complexe (tel qu'un liquide), à partir de ses composantes microscopiques. Comment peut-on par exemple comprendre les propriétés physiques de l'eau, qui peut être un liquide qui coule, un gaz ou un cristal ordonné, à partir de ses constituants que sont les molécules d'eau.

Les propriétés des liquides, des solides (ordonnés) et des gaz sont relativement bien comprises,

à une exception notable près : les verres et la « transition vitreuse ». Celle-ci produit un liquide qui ne coule pas, d'apparence solide, mais qui ressemble à s'y méprendre à un liquide à l'échelle microscopique.

La physique statistique s'applique également aux « biomolécules » comme les protéines et les autres biopolymères (ADN, ARN). Quand on les chauffe, elles se « déplient », puis une fois refroidies, « se replient » exactement suivant leur configuration initiale. Parmi la multitude de repliements a priori possibles, on ne sait toujours pas déterminer la solution adoptée par la nature.

La propagation des informations dans des réseaux, ou encore l'épidémiologie, sont d'autres champs d'applications de cette physique. Ainsi durant l'épidémie de grippe A, un chercheur de l'IPhT a-t-il été invité comme expert à une audition publique à l'Assemblée Nationale en 2009 pour apporter un éclairage scientifique à une problématique de santé publique (vaccination).

La matière condensée (liquide ou solide) est également étudiée, avec les outils de la mécanique quantique. Un des défis à relever concerne les propriétés remarquables des matériaux supraconducteurs<sup>4</sup> à haute température. Nous cherchons à les comprendre à travers la modélisation du comportement collectif des électrons présents dans ces matériaux.

1/ LHC : Large Hadron Collider (grand collisionneur de hadrons, des protons notamment).

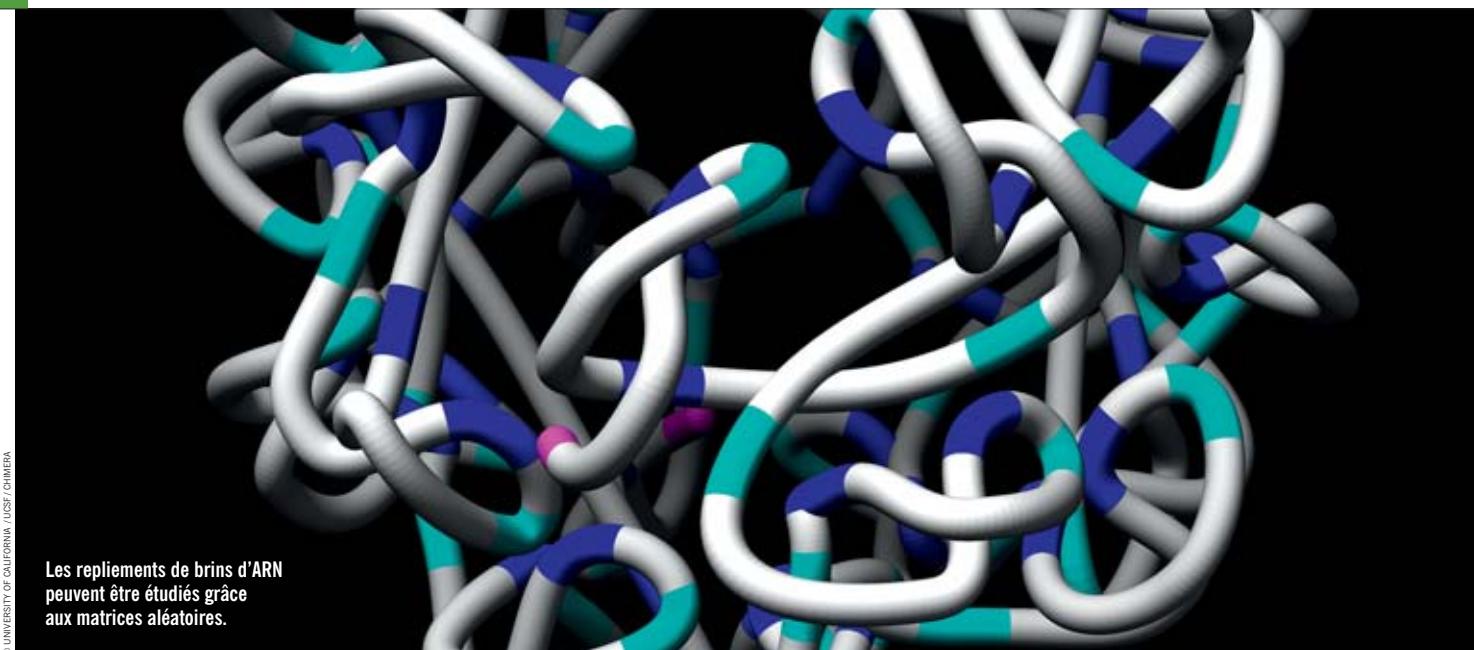
2/ La théorie des cordes s'intéresse à la genèse de l'Univers et à l'unification des quatre forces de la physique.

3/ La couleur d'un quark est une propriété sans relation avec l'acception habituelle de ce mot.

4/ Certains matériaux particuliers conduisent le courant électrique avec une résistance nulle, le plus souvent à des températures proches du zéro absolu (-273,15 °C). Certains d'entre eux sont supraconducteurs à « haute » température, vers -140 °C.



« L'IPhT se situe au meilleur niveau mondial. »



Les repliements de brins d'ARN peuvent être étudiés grâce aux matrices aléatoires.

# Matrices aléatoires

## Un outil mathématique très fécond

Depuis plusieurs décennies, les matrices aléatoires ont investi des domaines variés de la physique théorique dans lesquels excelle l'IPhT.

À première vue, on dirait des tableaux de nombres... Les matrices sont des objets mathématiques plutôt banals. Au lycée, les élèves apprennent à les manipuler pour résoudre des équations<sup>1</sup> en algèbre, ou pour passer d'un repère à l'autre<sup>2</sup> en géométrie. On peut effectuer des opérations sur des matrices, un peu comme on le fait avec des nombres, mais avec des « règles » différentes. Le formalisme matriciel est souvent utilisé pour les calculs réalisés par ordinateurs.

### Numéroter les pièces d'un moteur

« En physique, à quoi les matrices peuvent-elles servir ? Imaginez que vous numérotiez les pièces d'un moteur, explique Michel Bauer, chercheur en physique mathématique à l'IPhT. La façon dont les pièces sont reliées les unes aux autres est codée à l'intérieur d'une matrice : chaque élément de la matrice représente une interaction et sa position dans le tableau repère les deux pièces concernées. La matrice permet de calculer les fréquences de vibration caractéristiques du moteur. Un peu comme quand, pour certaines vitesses bien précises, tout se mettait à vibrer dans les voitures d'il y a quarante ans. »

De manière analogue, en physique quantique, un objet comme un atome peut être décrit par une matrice qui fournit les niveaux d'énergie qu'il peut atteindre. Ces grandeurs sont mesurables par les expérimentateurs.

### Noyaux atomiques et horaires de bus

Un peu moins banales sont les matrices aléatoires, dont les éléments sont des variables aléatoires. Dans les années 1950, un physicien, Eugene Paul Wigner<sup>3</sup>, a eu l'intuition qu'elles pourraient faire progresser la modélisation de certaines propriétés du noyau de l'atome. La matrice qui décrit le noyau est très compliquée et n'est connue que très imparfaitement. Wigner a proposé de la remplacer par une matrice aléatoire respectant certaines propriétés de symétrie imposées par les lois de la physique. Il n'est plus ici question de calculer précisément les niveaux d'énergie du noyau. Mais la théorie des matrices aléatoires permet d'en prédire certaines propriétés. Ainsi Wigner a-t-il pu expliquer qualitativement et quantitativement l'observation expérimentale suivante : la répartition statistique des niveaux d'énergie du noyau exclut des valeurs extrêmement proches.

« Curieusement, on s'est aperçu que les horaires de passage des bus au Mexique obéissent à une loi similaire, relève le chercheur. Ce n'est pas du tout le cas des bus parisiens par exemple. Pourquoi cette différence ? Au Mexique, la rémunération des conducteurs dépend de la fréquentation de leur bus, ce qui les incite à éviter deux passages consécutifs. »

### Des percées importantes

Les matrices aléatoires ont en réalité envahi des pans entiers de la physique et d'autres disciplines. « Elles permettent, de manière très naturelle, de recenser tous les types de surfaces possédant des propriétés données. Il est ainsi possible, grâce à elles, de décrire aussi bien des interactions entre particules, que les repliements de brins d'ARN<sup>4</sup>. » Les matrices aléatoires ont été développées, particulièrement à l'IPhT, dans les domaines de la gravité quantique à deux dimensions<sup>5</sup>, de la théorie des cordes, en physique de la matière condensée (pour décrire notamment le comportement des électrons), en biologie et... en mathématiques. Il arrive que le travail de physiciens théoriciens soit reconnu par la communauté des mathématiciens ! Ainsi plusieurs équations majeures de la théorie mathématique des matrices aléatoires portent-elle le nom de chercheurs de l'IPhT. « Historiquement, l'IPhT s'est intéressé aux matrices aléatoires dès leur apparition en physique, conclut Michel Bauer. Encore récemment, elles ont donné lieu à plusieurs percées importantes. »

1/ En particulier un système de  $n$  équations linéaires à  $n$  inconnues.

2/ Les coordonnées d'un point sont valables dans un repère donné. Il faut pouvoir calculer les nouvelles coordonnées de ce point dans un autre repère.

3/ Eugene Paul Wigner a été lauréat du prix Nobel de physique de 1963 « pour ses contributions à la théorie du noyau atomique et des particules élémentaires. »

4/ Acide ribonucléique : cette molécule biologique joue un rôle important dans la synthèse des protéines.

5/ La théorie de la gravitation et la mécanique quantique sont deux théories inconciliables. Les physiciens théoriciens s'attachent à élaborer une théorie susceptible de les englober.

# Des figures marquantes, une entreprise collective

**La science contemporaine est une entreprise collective, où chacun apporte sa pierre à l'édifice commun. Certains ont la chance d'effectuer des percées et d'acquérir un renom mondial.**

On peut citer un grand nombre de figures marquantes parmi les anciens membres du Service de physique théorique (SPhT, aujourd'hui rebaptisé Institut de Physique Théorique) : en physique nucléaire, Claude Bloch, pionnier du problème à N corps avec Cirano De Dominicis, lequel a aussi contribué à l'étude des systèmes désordonnés ; en théorie des phénomènes critiques (caractérisés par une invariance par changement d'échelle), théorie qui s'étend de la théorie quantique des champs et particules aux transitions de phase, Claude Itzykson, Édouard Brézin et Jean Zinn-Justin ; en physique des particules, Marcel Froissart et Maurice Jacob ; en physique mathématique, Madan Lal Mehta, pionnier des matrices aléatoires, et Michel Gaudin, auteur de résolutions élégantes de modèles ; en mécanique statistique et physique de la matière condensée, Jacques des Cloizeaux, éminent polymériste, Roger Balian et Bernard Derrida, ayant tous deux contribué à des problèmes très divers, enfin Stanislas Leibler, passé progressivement à la biologie. Leurs travaux ont eu un impact durable et



« **Le plus grand des hasards, surprises quantiques** » de Jean-François Dars et Anne Papillault, Belin, 20 €

Soixante-cinq chercheurs français, parmi lesquels on compte plusieurs théoriciens du CEA, livrent leur confrontation personnelle au monde étrange de la physique quantique.

sont souvent devenus l'objet de cours universitaires.

Une place à part doit être réservée à Albert Messiah ; son cours de mécanique quantique professé à Saclay dans les années 1950 a été le premier enseignement structuré de cette discipline dans notre pays, pourtant patrie de Louis de Broglie. Il a inspiré toute la physique de notre pays – y ont assisté Alfred Kastler et les jeunes Claude Cohen-Tannoudji et Pierre-Gilles de Gennes<sup>1</sup> – et continue sous la forme de traité à être utilisé dans les universités du monde entier.

## Essaimages

Après s'être illustrées au SPhT, beaucoup parmi ces personnalités ont essaimé, vers d'autres départements du CEA où ils ont occupé des postes de haute responsabilité, vers le Collège de France, l'École normale supérieure, le CERN ou de grandes universités américaines. Parmi les sept directeurs qu'a eus, depuis sa création en 1951 par Cécile DeWitt, l'École d'été de physique théorique des Houches, organisme prestigieux à l'échelle mondiale, quatre sont issus du SPhT. L'Académie des sciences compte parmi ses membres trois anciens du SPhT, et a élu l'un d'eux comme président. Le SPhT a aussi fourni plusieurs professeurs à l'École polytechnique, quatre présidents à la Société française de physique, un président au CNRS. Son rayonnement mondial est attesté par des appartenances à des académies étrangères et par de grands prix internationaux, par exemple une médaille Boltzmann.

L'héritage est impressionnant. L'histoire de l'institut continue de s'écrire avec le même niveau d'excellence, comme en témoigne le nombre remarquable de lauréats distingués par le Conseil européen de la recherche.

1/ Tous les trois ont reçu le prix Nobel de physique.



Albert Messiah

**L'IPhT en bref**  
une tradition d'excellence  
depuis 1963...

**6 000**  
publications

**150** thèses

**Des cours devenus des classiques :** Messiah, Balian, Blaizot-Ripka, des Cloizeaux-Jannink, Drouffe-Itzykson, Itzykson-Zuber, Negele-Orland, Zinn-Justin

**24** prix de l'Académie  
des Sciences

**27** prix de la Société  
française de  
physique

**9** médailles du CNRS

**6** lauréats de bourses  
du Conseil européen  
de la recherche

(ERC : European Research Council)



# Comprendre la rupture

Des physiciens de Saclay cherchent à comprendre exactement ce qu'il se passe dans le verre au moment où il casse.



À quelle vitesse une fissure se propage-t-elle dans le plexiglas® ?

Un matériau **fragile**<sup>1</sup> comme le verre ou le plexiglas® peut casser lentement, disons en plusieurs jours. Une théorie élaborée dans les années 50 décrit bien l'expérience dans ce cas de rupture « lente ». En revanche, si celle-ci se produit rapidement, en quelques microsecondes par exemple, alors les phénomènes observés ne collent plus du tout avec la théorie, ce qui signifie que les mécanismes en jeu sont mal compris. Rassurez-vous, cette incertitude ne gêne aucunement les ingénieurs pour dimensionner avions, bateaux ou fusées. Ils connaissent parfaitement, pour chaque matériau, les seuils de **contrainte mécanique** à partir desquels le processus de rupture peut s'enclencher.

Tout commence avec une **fissure**, qui progresse le long d'un matériau en le « déchirant ». À la fin des années 90, des physiciens se sont interrogés sur la vitesse de propagation des fissures. Ils ont observé que celle-ci ne peut pas dépasser la moitié de la valeur maximale prédite par la théorie. Comment expliquer cette anomalie ? En 1999, une équipe israélienne a pu montrer que pour les plus hautes vitesses, le front de fis-

suration se fragmente en de multiples fissures secondaires qui « absorbent » une partie de l'énergie disponible au détriment de la fissure principale. Ce phénomène a pour effet de ralentir la progression du front global. D'où le déficit de vitesse observé.

## Une surprise : des écailles de poisson

Cependant, cela ne permet pas d'expliquer la relation entre l'énergie dite de **fracture**<sup>2</sup> et la vitesse de propagation de la fissure pour le régime de vitesses intermédiaires. Une équipe de chercheurs du CEA, du CNRS et de Saint-Gobain a donc choisi d'étudier ce domaine particulier. Depuis trois ans, des expériences ont ainsi été conduites sur le plexiglas® dans un laboratoire de l'IRAMIS<sup>3</sup>, au centre CEA de Saclay.

Une surprise attendait les chercheurs... Ils ont mis en évidence une autre anomalie, accompagnée d'un changement d'aspect du plexiglas® : la surface de rupture observée au microscope se couvre soudain de sortes de mini-écailles de poisson ! Des microfissures particulières, de forme circulaire cette fois, se développent en amont du front principal. Lorsque ce dernier les « rattrape », elles forment ces écailles<sup>4</sup> à l'avant du front, accélérant la progression de la fissure principale au lieu de la ralentir. À plus haute vitesse, c'est le phénomène de microfissurations déjà cité qui l'emporte.

Cette recherche qui peut paraître très fondamentale intéresse beaucoup les géophysiciens qui voudraient comprendre pourquoi un séisme peut se propager à des vitesses très élevées. La compréhension fine des phénomènes de rupture pourrait également inspirer des innovations en sciences des matériaux, qui sait ?

Agnès Deslis

1/ Les mots surlignés renvoient à l'encadré.

2/ Elle représente l'énergie nécessaire pour que la surface dévoilée par la progression de la fissure augmente d'une unité d'aire.

3/ IRAMIS : Institut rayonnement matière de Saclay.

4/ L'intersection d'un cercle et d'un plan est une « conique », dont la forme évoque celle de l'écaille.



Visualisation des contraintes à l'intérieur du plexiglas®.

## Rupture, mode d'emploi

Un matériau est dit **fragile** lorsqu'il se rompt de manière brutale. À l'opposé, un matériau ductile se déforme avant de casser. Le verre est fragile alors que le caramel est ductile.

Une fissure prend naissance au sein d'un matériau fragile sous l'effet d'une **contrainte mécanique** : en le tirant, le tordant ou le pinçant, on lui apporte de l'énergie mécanique que l'on peut mesurer. Une fissure démarre toujours sur un « point faible » (ou défaut) du matériau. Les physiciens mesurent l'énergie dépensée par la fissure, d'une part pour la fracture proprement dite et d'autre part, pour son déplacement (énergie cinétique). C'est en mesurant la **vitesse de propagation** de la fissure que les physiciens accèdent, indirectement, à l'énergie de fracture.



# Des portraits-robots de protéines très efficaces

Une technique originale d'identification de protéines, développée par des biologistes de Saclay, a été appliquée pour la première fois à des virus capables d'infecter des bactéries. Ces travaux menés au CEA en collaboration avec l'INRA<sup>1</sup> offrent de précieux outils à la recherche biologique la plus fondamentale et ouvrent la voie à de nombreuses applications en biotechnologies.

**L**es bactériophages sont des virus qui ont la particularité de ne s'attaquer qu'aux bactéries. Découverts au début du XX<sup>ème</sup> siècle, ils sont rapidement apparus comme une voie possible pour traiter les infections bactériennes avant d'être abandonnés au profit d'autres substances.

Aujourd'hui, leur étude connaît un regain d'intérêt parce que les biotechnologies utilisent des bactéries pour des productions industrielles et plus fondamentalement, pour mieux comprendre les écosystèmes dans lesquels les populations bactériennes et les bactériophages se livrent une guerre permanente.

Ce sont également, et surtout pour les biologistes de Saclay, des outils fondamentaux de recherche et d'étude en génétique moléculaire.

## Une stratégie innovante

L'histoire commence avec une méthode originale, développée par des chercheurs CEA de l'iBiTec-S<sup>2</sup>, pour étudier la plasticité génomique d'un petit organisme, *Helicobacter pylori*. L'une des caractéristiques de cette bactérie, responsable de pathologies de l'estomac, est d'avoir des séquences génétiques assez éloignées de celles des autres organismes du même type, ce qui rend plus difficile l'identification de ses gènes. Pour comprendre la capacité d'évolution de son génome, et découvrir la fonction de ses gènes, les biologistes du CEA ont dû affûter leurs outils. « *Puisqu'il n'était pas possible de reconnaître les séquences des gènes, nous avons cherché à passer par la prédiction de structure des protéines associées à ces gènes, grâce à des approches bioinformatiques* », explique Raphaël

Guérois qui a piloté ce travail. D'un organisme à l'autre, les protéines assurant une même fonction présentent en effet des analogies de leur structure spatiale. En clair, les chercheurs ont mis au point une stratégie innovante qui revient à dresser un portrait-robot 3D de la protéine. Cette méthode a permis, de manière inattendue, d'identifier des protéines qui jouent un rôle important dans l'Évolution des espèces.

## Des protéines spécialisées dans le brassage génétique

Et c'est là que les bactériophages font leur entrée. En effet, en matière d'Évolution, ils sont les champions ! Raphaël Guérois et son équipe ont alors l'idée de collaborer avec une chercheuse de l'INRA, Marie-Agnès Petit, qui s'intéresse justement à la capacité qu'ont les bactériophages de créer de nouvelles séquences d'ADN et plus particulièrement à leurs recombinaisons, ces protéines capables de couper et de recoller les séquences d'ADN. Présentes dans tous les organismes vivants, elles sont, chez les bactériophages, beaucoup plus tolérantes aux petites divergences. Si par exemple, dans le génome humain, les recombinaisons

ne peuvent réparer que des brins d'ADN absolument identiques, chez les bactériophages, elles vont recoller des bouts de brins légèrement différents.

La rencontre des deux équipes a été très fructueuse. En appliquant leur méthode du portrait-robot, les chercheurs ont montré que l'architecture tridimensionnelle des machineries biologiques de réparation de l'ADN a été conservée assez fidèlement au cours de l'Évolution, chez tous les organismes vivants qui en sont pourvus, des bactériophages à l'Homme. En particulier, ils ont identifié des recombinaisons chez certains bactériophages qui étaient réputés ne pas en avoir et ont validé *in vivo* ces découvertes.

C'est précisément cette machinerie de réparation que les biotechnologies exploitent pour détourner le métabolisme de bactéries à des fins de production. Les chercheurs en biologie fondamentale, quant à eux, modifient le génome des organismes vivants qu'ils étudient pour mieux les connaître.

Gaëlle Degrez

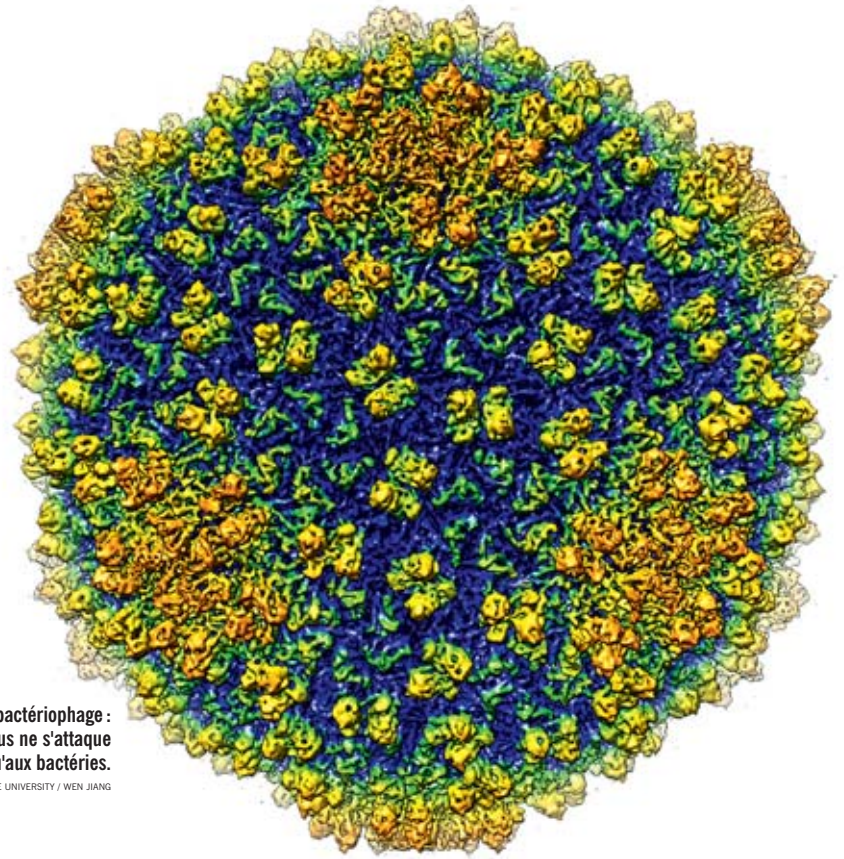


Image d'un bactériophage : ce virus ne s'attaque qu'aux bactéries.

© PURDUE UNIVERSITY / WEN JIANG

1/ Institut national de la recherche agronomique.  
2/ Institut de biologie et de techniques de Saclay.

# Des images pour sécuriser ou s'orienter

Améliorer la sécurité des passagers dans les transports en commun ou permettre à des pompiers de se guider à l'intérieur d'un bâtiment : deux applications pour les technologies de capture et d'analyse d'images développées par l'institut CEA LIST<sup>1</sup>.

Elles font tellement partie de notre quotidien qu'on en oublierait presque qu'elles sont en fait assez récentes. Si les premières caméras ont fait leur apparition au siècle dernier, elles ont considérablement évolué pour devenir les systèmes compacts, numériques, haute définition que nous utilisons aujourd'hui... Aujourd'hui, l'enjeu de ces caméras embarquées dans de nombreux dispositifs dédiés aux loisirs, à la navigation ou à la sécurité, réside dans la performance du traitement d'images associé. Exemple avec deux projets menés par des équipes du CEA LIST.

## Un train d'avance

Les dispositifs vidéo contribuent déjà à la sécurité dans de nombreuses infrastructures, y

compris dans les zones de transit (gares, aéroports). Dans les trains en circulation, il est beaucoup plus difficile d'interpréter les images des caméras, compte tenu des fluctuations de fréquentation et de niveau sonore par exemple. Cependant le projet ANR SURTRAIN<sup>2</sup>, initié en 2006, avait pour objectif d'améliorer la sûreté des passagers et du personnel en proposant une technologie originale de détection et de suivi des situations à risques.

Exemple concret ? Une personne qui tire le signal d'alarme et s'enfuit : comment la localiser dans le train ? « *Le traitement des images acquises par les caméras embarquées dans un train est très complexe du fait des variations lumineuses fortes et rapides et de la configuration même des trains, avec l'alternance d'environne-*

*ments différents* », explique Patrick Sayd, l'un des chercheurs impliqués dans ce projet. Le dispositif<sup>3</sup> développé repose sur un réseau de caméras équipées d'objectifs grand angle. Si la capture d'images de qualité est un premier défi, le véritable enjeu réside dans leur analyse et leur traitement en temps réel afin d'en extraire l'information pertinente.

« *En choisissant des objectifs grand angle, nous disposons d'une perspective à 180° mais qui entraîne d'importantes distorsions des images* ». La prise en compte de ces distorsions dans les algorithmes de suivi de personnes est une spécificité des approches développées au CEA LIST. En mai 2010, un prototype a été testé avec succès en conditions d'exploitation commerciale dans un train de la SNCF. Ces résultats



Se repérer à l'intérieur d'un bâtiment au mètre près, c'est possible à l'aide d'une caméra et d'un traitement d'images utilisant des vues des locaux, enregistrées au préalable.





Le traitement des images de caméras installées dans des trains est très complexe.

© FOTOLIA

ont permis de prolonger le partenariat avec la SNCF et les équipes du CEA LIST poursuivent leurs travaux pour perfectionner le système. «Aujourd'hui, nous avons montré dans un train la faisabilité du suivi de personnes, clé de voûte de l'analyse de scène. Nous pouvons à présent aborder le développement de nouvelles fonctionnalités, telles que le comptage et la localisation des personnes ou, de manière plus ambitieuse, la reconnaissance de situations critiques : malaises, incivilités, agressions, etc. ».

### Géolocalisation 3D

Autre cas de figure, celui de la localisation de personnes en mouvement dans des bâtiments non équipés de réseaux de capteurs ou de caméras. À l'heure du GPS, la question peut sembler triviale et pourtant, les signaux GPS sont inaccessibles en intérieur et aucune technologie n'offrirait jusqu'à présent de solution satisfaisante. C'est dans le cadre du projet européen Easy Interaction, que les chercheurs du CEA LIST ont développé depuis 2007 une solution innovante, en partenariat avec la société EADS. L'industriel commercialise en effet des terminaux de communication spécialement adaptés aux troupes d'intervention telles que les pompiers ou le GIGN. Combiner ces terminaux avec un système de géolocalisation performant était tout l'enjeu du projet. Les chercheurs du CEA LIST ont développé un système de localisation reposant sur l'odométrie\* visuelle, une technologie de pointe qui permet de calculer en temps réel la trajectoire d'une personne équipée d'une caméra. « Nous connaissons les limites de cette technologie, les sources de dérives, c'est-à-dire les accumulations d'erreurs qui, au bout d'un certain temps, peuvent introduire une imprécision de plusieurs mètres dans la localisation des personnes, explique Sylvie Naudet-Collette, chercheuse au CEA LIST.

*Nous avons donc ajouté une brique technologique supplémentaire qui permet de corriger les dérives inhérentes au système initial. »* Pour cela, les chercheurs ont proposé un algorithme combinant la localisation par vision avec la reconnaissance des lieux, ce qui permet de se recalculer parfaitement avec une précision de l'ordre du mètre. Cette solution novatrice permet de mettre ponctuellement en correspondance les images du flux vidéo avec des images du bâtiment préalablement acquises et géolocalisées.

Enfin, pour pallier les problèmes de mouvements brusques et d'occultation du champ de vue de la caméra, une centrale inertielle, c'est-à-dire un capteur qui donne des informations complémentaires sur le mouvement ou l'orientation, a été couplée au système. Ce dispositif particulièrement performant ouvre de nouvelles perspectives : ses utilisateurs pourront accéder à des informations numériques 2D ou 3D superposées aux images en temps réel. On entre là dans le domaine de la réalité augmentée, une technologie dont le marché, en plein essor, est très vaste puisqu'il compte nombre d'applications grand public et professionnelles telles que la navigation mais aussi les jeux vidéo, l'assistance à la vente, aux technologies biomédicales ou encore à la maintenance industrielle.

**Gaëlle Degrez**

- 1/ L'institut CEA LIST mène des recherches dans le domaine des systèmes intelligents.
- 2/ SURTRAIN associe la SNCF, le CEA LIST, l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS) et la société Martec.
- 3/ Ce dispositif s'appuie sur l'infrastructure de communication mise en place par la société Martec et sera couplé avec un système de détection d'événements sonores développé par l'INRETS.
- 4/ Mesure de distances.

en bref...

### Des aimants japonais testés à Saclay

Les aimants supraconducteurs du pilote japonais d'étude de fusion nucléaire JT60 (tokamak) seront testés à Saclay à partir de juillet 2011. La modernisation de JT60 a été décidée en même temps que l'implantation d'ITER en Europe.

### Le CEA signe avec la société NBC-Sys

Le CEA et la société NBC-Sys ont signé en novembre dernier un accord de licence relatif à des tests de détection rapide d'agents potentiellement utilisables par des bioterroristes.

Développés en collaboration avec des biologistes de Saclay, ces tests se présentent sous la forme de bandelettes rassemblées dans une mallette. Plusieurs kits ont d'ores et déjà été vendus.

### Décontaminer avec AspiLaser®

Le dispositif AspiLaser® de décontamination de surfaces par laser, étudié et développé à Saclay, va être industrialisé par la société SDMS-Provence. Il sera exploité pour le démantèlement d'installations nucléaires, notamment du CEA, et contribuera à réduire les doses reçues par les opérateurs, la quantité de déchets produits et, par conséquent, le coût des chantiers.

### Images du cerveau produites à NeuroSpin

Pour la première fois, des images du cerveau ont été produites à NeuroSpin (centre de recherche sur le cerveau, à Saclay) avec une IRM à 7 teslas selon le mode opératoire qui sera nécessaire pour l'IRM à très haut champ (11,7 teslas) en cours de construction. Cette technique particulièrement permet d'obtenir des images plus homogènes, plus contrastées et mieux résolues.

### Graines de science

En octobre 2010, la 12<sup>ème</sup> édition de « Graines de science » a réuni en Corse une trentaine de professeurs des écoles et de formateurs d'enseignants pendant une semaine autour d'ateliers de « La main à la pâte ».



Un physico-chimiste de Saclay, François Piuze, a fait découvrir aux participants la richesse des objets technologiques de notre quotidien, leur fonctionnement, leur utilisation possible, leur recyclage, etc.

### Ethera vient de recevoir le Grand Prix de l'innovation

La start-up Ethera vient de recevoir le grand prix de l'innovation de la ville de Paris. Son projet consiste à fabriquer et commercialiser des capteurs permettant non seulement de détecter mais aussi d'éliminer les polluants de l'air intérieur. Ces dispositifs utilisent des matériaux poreux issus de travaux réalisés au CEA, à Saclay et à Grenoble.



# Des indices sur l'origine de la vie

Une composante très minoritaire du rayonnement cosmique, les ions lourds, jouerait un rôle significatif dans l'apparition de molécules complexes, précurseurs de la vie, au sein de « glaces » extraterrestres. C'est ce que suggèrent des résultats obtenus par une équipe de l'Institut rayonnement et matière de Saclay, au GANIL, à Caen.

Il ne pèsent que quelques pourcents dans le cocktail composant le rayonnement cosmique mais leur efficacité dans l'émergence des briques élémentaires de la vie serait bien supérieure ! Les ions lourds possèdent un pouvoir « ionisant<sup>1</sup> » décuplé par rapport à celui des protons (80 % du rayonnement cosmique) ou des noyaux d'hélium (15 %). À énergie égale, ils détruisent dix fois plus de liaisons chimiques dans les molécules de glace, de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) qui composent les « glaces » présentes dans les comètes ou dans certaines régions interstellaires.

Les espèces chimiques issues de ces cassures peuvent ensuite donner naissance à de nouvelles molécules organiques, plus complexes, à partir desquelles le vivant a pu se construire.

## Naissance d'un acide aminé

Pour la première fois, une équipe du CIMAP<sup>2</sup>, à Caen, a soumis un mélange de plusieurs « glaces » (H<sub>2</sub>O, CO, NH<sub>3</sub>) au bombardement d'ions lourds, dans le cadre d'une collaboration internationale<sup>3</sup>. Première étape de l'expérience, des échantillons de glace sont créés par condensation de molécules simples (H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) à une température de -259° C.

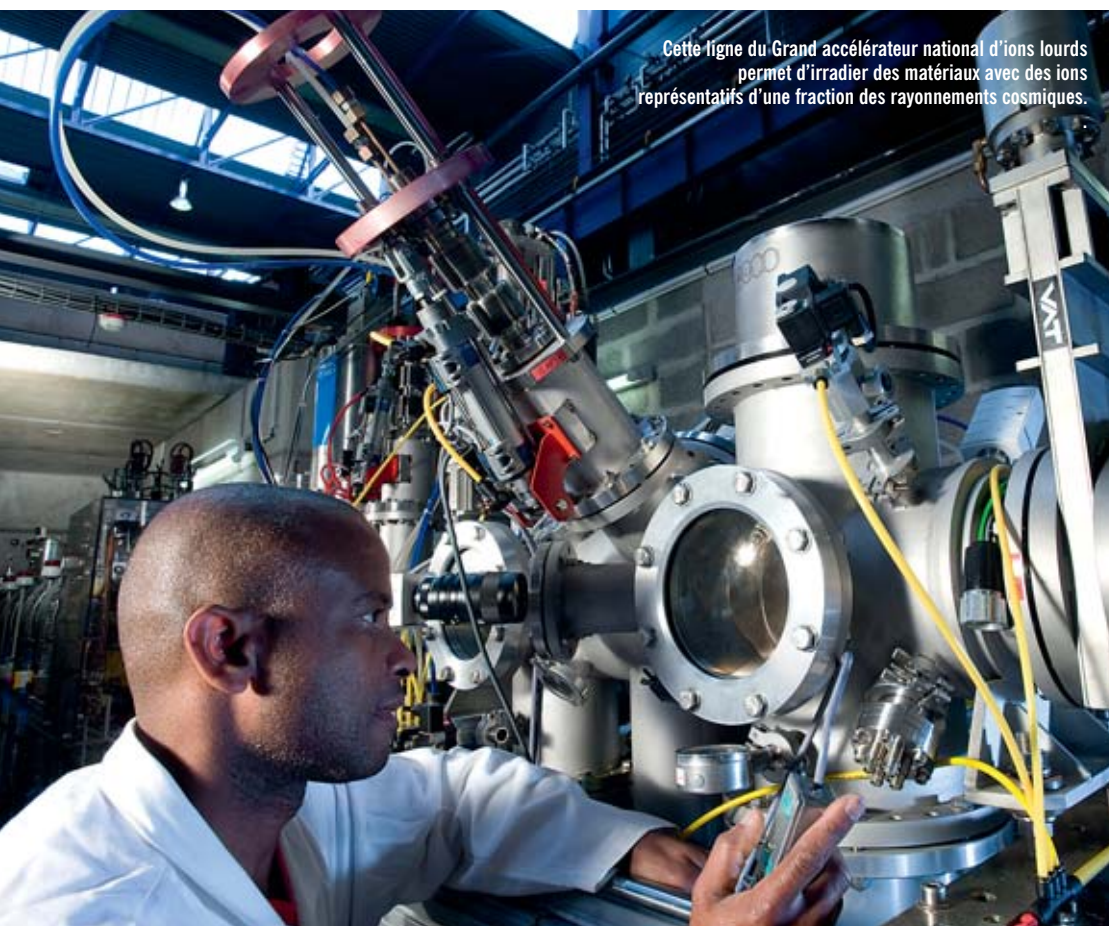
Cette glace est ensuite exposée à un faisceau d'ions lourds (fer ou nickel) produit par le GANIL. Les modifications de la composition chimique de l'échantillon induites par les ions sont alors suivies par spectroscopie infrarouge (IRTF : voir l'encadré p.13), une technique qui permet une analyse en ligne, le long de la trajectoire des ions.

Les chercheurs ont ainsi pu quantifier la destruction des molécules initiales et mettre en évidence l'apparition de nouvelles molécules, en particulier un acide aminé<sup>4</sup>, bon candidat en tant que molécule précurseur de la vie. Des analyses chimiques complémentaires sont en cours pour confirmer ces premiers résultats.

## Un mystère astrophysique élucidé

Un autre domaine où excellent les ions lourds est une variante du billard, la pulvérisation. Au cours de ce processus physique, le bombardement d'une cible par un projectile conduit à l'éjection d'un ou plusieurs noyaux atomiques de la cible. Dans le cas des ions lourds, ce jeu de billard devient fantastique. Alors qu'un proton ou un noyau d'hélium est capable d'éjecter une à dix « boules », un ion lourd peut en extraire jusqu'à 10 000 ! L'analyse de ce phénomène a permis d'élucider le mystère de la présence de monoxyde de carbone gazeux autour de grains de poussières dans certaines régions de l'Univers, à des températures où cet élément devrait être solide (-249°C). Il semble que la pulvérisation par les ions lourds de ces nuages de matière soit responsable de cette anomalie.

Gaëlle Degrez



Cette ligne du Grand accélérateur national d'ions lourds permet d'irradier des matériaux avec des ions représentatifs d'une fraction des rayonnements cosmiques.

© P. STROPPA, CEA

1/ Ioniser un atome ou une molécule consiste à lui arracher un ou plusieurs électrons.

2/ Le Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique est une unité mixte de recherche du CEA, du CNRS, de l'ENSICAEN et de l'Université de Caen.

3/ Ces travaux ont été menés dans le cadre d'un Programme Hubert Curien entre la France et le Brésil et sont le fruit d'une collaboration avec une équipe de l'Université PUC (Rio de Janeiro), l'Université fédérale de Santa Catarina (Florianópolis), l'Université du Vale do Paraíba (San José dos Campos, Sao Paulo) ainsi qu'avec Emmanuel Dartois, de l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay.

4/ La glycine.



Un faisceau lumineux traverse le(s) gaz à analyser (rose). La fraction absorbée permet d'identifier les gaz présents et de mesurer leur concentration.



© P. STROPPA / CEA

## Analyse de gaz en ligne

Identifier d'éventuels relâchements gazeux dans divers processus industriels du nucléaire, c'est le travail d'une équipe de la Direction de l'énergie nucléaire, à Saclay, en collaboration avec le centre CEA de Marcoule.

L'opération consistant à incorporer des déchets nucléaires à haute activité à du verre en fusion (vitrification) met en jeu certains composés volatils comme le tétraoxyde de ruthénium nécessitant une étape de recyclage (via un traitement des gaz). Dans quelles conditions expérimentales cette volatilité est-elle susceptible de se produire ? Dans quelles proportions ?

### Un appareil commercial peu onéreux

Pour répondre à ces questions, des ingénieurs du Département de physico-chimie (DPC) de

Saclay ont eu l'idée d'utiliser, moyennant quelques adaptations, un appareil commercial d'analyse chimique peu onéreux : la spectroscopie infrarouge<sup>1</sup> par transformée de Fourier (IRTF : voir l'encadré).

Pour obtenir un signal (ou spectre) exploitable, il faut commencer par ajuster la longueur du parcours de la lumière infrarouge dans le gaz à la gamme de mesures désirée. Et pour quantifier la concentration en molécules, il faut disposer de données physiques relatives aux spectres.

### Mieux connaître les rejets gazeux

« Nous avons dû étudier la spectroscopie du tétraoxyde de ruthénium, jusqu'alors mal connue, précise Denis Doizi, chercheur au DPC. Ce travail, mené en collaboration avec le Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques<sup>2</sup> (LISA) de Créteil, sera valorisé par des publications scientifiques communes. »

Les expériences ont commencé sur des échantillons « modèles », fournis par des chercheurs de Marcoule. « Lorsqu'on chauffe le calcinat<sup>3</sup> seul, on observe un dégagement de tétraoxyde de ruthénium mais en présence de la fritte de verre<sup>4</sup>, on ne voit plus rien, explique Denis Doizi.

### LE SAVIEZ-VOUS ?

L'atmosphère gazeuse des planètes de notre système solaire, la qualité de l'air respiré dans les grandes villes sont mesurées grâce à des spectromètres IRTF.

*Il semblerait qu'une croûte de verre se forme et confine le gaz. Nous allons étudier les conditions précises dans lesquelles le tétra-oxyde peut être libéré. »*

Conjointement à cette étude, les chimistes de Saclay préparent l'installation d'un dispositif d'analyse en ligne de ce gaz sur le pilote de vitrification du centre CEA de Marcoule. L'objectif est de mieux comprendre la dynamique de décomposition partielle du ruthénium sous forme gazeuse pour étendre le domaine de fonctionnement du procédé.

1/ Le rayonnement infrarouge est une « lumière » moins énergétique que la lumière visible.

2/ Unité mixte de recherche du CNRS, de l'Université Paris 12 et de l'Université Paris Diderot.

3/ Produit de la combustion du matériau « modèle ».

4/ Précurseur pilé du verre utilisé pour le confinement des déchets nucléaires.

### Qu'est-ce que l'analyse chimique par IRTF ?

La spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier (IRTF) consiste à éclairer l'échantillon à analyser à l'aide du rayonnement infrarouge\* émis par un filament en carbure de silicium chauffé à 1 300°C. Celui-ci interagit avec les molécules à doser, ce qui se traduit par une absorption sélective de la lumière, d'autant plus importante que la concentration en molécules est élevée.

\* Le rayonnement infrarouge est une « lumière » moins énergétique que la lumière visible.



L'analyse de molécules produites par le métabolisme cellulaire permet de détecter la signature d'un phénomène biologique.



# De nouveaux outils pour la santé et l'environnement

Étape ultime après l'analyse des gènes et des protéines, l'étude à grande échelle de petites molécules organiques, les métabolites, apporte une information précieuse sur la nature d'un échantillon biologique. C'est le service que propose à ses clients, Profilomic, toute jeune start-up soutenue par le fonds CEA Investissement.

À l'ère de la postgénomique, un nouveau moyen d'investigation, la métabolomique, retient depuis une petite dizaine d'années, l'intérêt des spécialistes des biotechnologies. Cette discipline récente permet d'analyser l'ensemble des molécules biochimiques présentes dans un échantillon donné.

## Une technologie de pointe

Le Service de pharmacologie et d'immunologie (SPI) de l'Institut de biologie et de technologies de Saclay (iBiTec-S) a été l'un des pionniers de ce domaine, en particulier grâce à sa maîtrise des technologies de spectrométrie de masse à ultra-haute résolution couplée à des analyses statistiques sophistiquées. S'appuyant sur cette expertise, Bruno Corman, chercheur au CEA, a créé avec Geoffrey Madalinski la start-up Profilomic, le 2 juillet 2010, dans le cadre de

l'essaiage du CEA et du programme transverse « Technologies pour la santé » du CEA. Les débouchés commerciaux sont nombreux dans ce domaine. « Grâce à nos technologies de pointe, nous obtenons des signatures de phénomènes biologiques, ce qui est très intéressant pour tester l'efficacité d'un médicament, identifier les phases précoces de pathologies comme les cancers ou la maladie d'Alzheimer, rechercher des biomarqueurs de suivi thérapeutique, etc. Cela intéresse les laboratoires pharmaceutiques et les entreprises de biotechnologies », détaille Bruno Corman. Outre cette activité biomédicale, Profilomic propose également des prestations dans le domaine de l'environnement, un marché en plein boom. « La problématique des polluants émergents et notamment des dérivés de médicaments qui se retrouvent dans l'environnement, l'eau ou l'alimentation se développe très

fortement ». La métabolomique est l'une des méthodes les plus efficaces pour la détection de molécules indésirables qui peuvent s'avérer toxiques pour l'homme. Les industries agro-alimentaires et les industriels de l'eau sont donc des clients potentiels de Profilomic.

## Le goût d'entreprendre

Et des clients, la start-up en a déjà. « Nous avons créé Profilomic sous la forme d'une société anonyme à partir du moment où nous avons signé nos premiers contrats », précise Bruno Corman et chose inhabituelle, ce sont le PDG et ses associés qui ont apporté la mise de fonds initiale. Aujourd'hui, Profilomic est déjà dans une phase opérationnelle. L'équipe, composée de cinq personnes salariées et d'un étudiant stagiaire de master 2, est pour l'instant hébergée dans les locaux CEA du SPI. Bruno Corman se donne deux ou trois ans avant que Profilomic puisse prendre son envol. Et il a de quoi être optimiste. Sa société, la seule à proposer cette prestation en France, n'a qu'une poignée de concurrents dans le monde. Il faut dire que Bruno Corman n'en est pas à son coup d'essai. Il y a dix ans, il créait « Successful Aging Database », une start-up spécialisée dans la gestion du capital santé, aujourd'hui florissante.

Gaëlle Degrez



# Osiris fait peau neuve

## ... et repart pour 5 ans

Les travaux nécessaires à la prolongation de l'exploitation du réacteur Osiris pour cinq ans sont achevés depuis le mois de novembre dernier. Une bonne nouvelle pour la sécurité d'approvisionnement en radioéléments à usage médical.

L'Autorité de sûreté nucléaire<sup>1</sup>(ASN) a accordé au CEA l'autorisation de poursuivre l'exploitation d'Osiris jusqu'en 2015 après remise d'un dossier de réexamen de sûreté (voir l'encadré) et une fois les travaux nécessaires réalisés. Le calendrier prévu a été parfaitement respecté, et ce, malgré la modification d'agenda induite par la pénurie récente en radioéléments médicaux.

### Prolonger la durée de vie du réacteur

Il ne s'agissait pas à proprement parler d'opérations de jouvence, comme ce fut le cas en 2001-2002, avec le remplacement du « caisson » du cœur du réacteur.

Les travaux, qui ont nécessité plusieurs arrêts techniques, visaient cette fois à satisfaire le niveau de sûreté demandé pour la prolongation de la durée de vie de l'installation.

Un sas a été construit afin d'isoler les camions de transport de matières radioactives lors des opérations de manutention des emballages. Un nouveau circuit de ventilation a été installé. Un revêtement étanche a été appliqué sur les murs de la salle située sous la piscine du réacteur, qui accueille les mécanismes de pilotage des barres de commande.

La liste des travaux réalisés ne s'arrête pas là. D'autres améliorations concernent la résistance aux séismes, la fiabilité des moyens de levage, ou encore la modernisation du système d'affichage des informations.

### Sécuriser l'approvisionnement en molybdène 99

Osiris a donc repris la production de radioéléments, en particulier celle de molybdène 99 (<sup>99</sup>Mo). Ces atomes radioactifs destinés à l'imagerie médicale sont obtenus par fission nucléaire de l'uranium. La crise que la pénurie du premier semestre 2010 faisait craindre n'a pas eu lieu en Europe, du fait du redémarrage

des deux principaux réacteurs producteurs situés au Canada et aux Pays-Bas et de la planification légèrement différée des travaux sur Osiris.

Une période d'incertitude demeure cependant pour la période 2015-2020. Pour satisfaire une demande toujours soutenue, le renouvellement des réacteurs en fin de vie serait nécessaire : la construction du réacteur Jules Horowitz (RJH), à Cadarache, et l'adaptation du réacteur FRM2<sup>2</sup>, à Munich ne permettront sans doute pas d'assurer à eux seuls la sécurité d'approvisionnement de l'Europe en <sup>99</sup>Mo. Il faudrait pour cela une 3<sup>ème</sup> installation. Enfin, le modèle économique en vigueur ne reflète pas le coût réel des radioéléments et devra être adapté.

*Séverine Bouvart*



Manipulation d'un « château » contenant des radioéléments à usage médical.

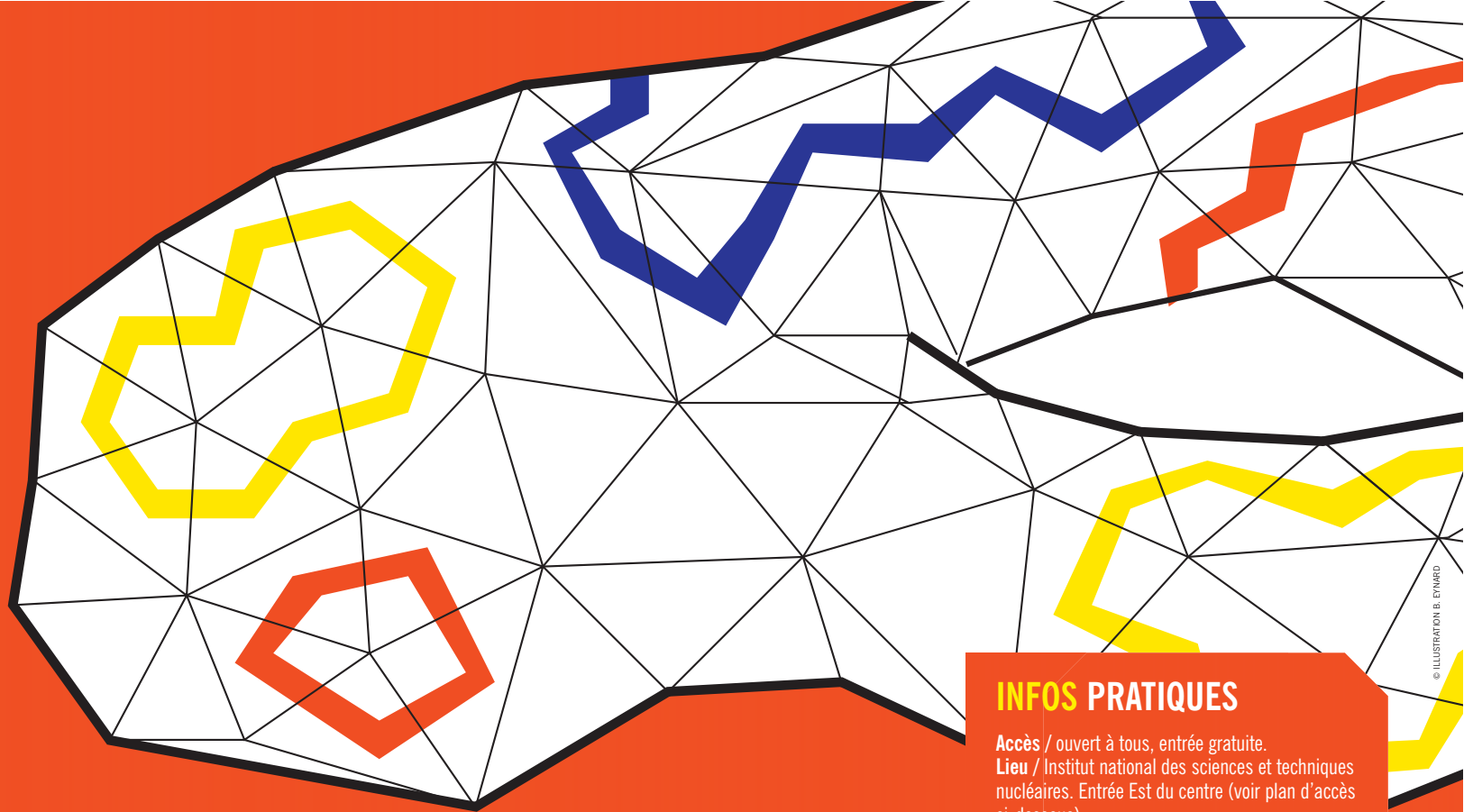
### En quoi consiste un dossier de réexamen de sûreté ?

Ce document présente l'analyse critique de l'état d'une installation nucléaire, afin d'en assurer le fonctionnement normal, de prévenir les accidents et d'en limiter les effets. Rédigé par le chef de l'installation (l'exploitant), il est transmis à l'ASN qui l'instruit. La loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (dite « loi TSN ») rend obligatoire cette procédure, tous les dix ans.

1/ ASN : autorité administrative indépendante française créée en juin 2006 qui assure au nom de l'État le contrôle du nucléaire pour protéger le public, les travailleurs et l'environnement, ainsi que l'information des citoyens.  
2/ Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz.



Le réacteur Osiris permet d'étudier le comportement de matériaux sous irradiation. Une partie de son exploitation est consacrée à la production de radioéléments à usage médical et au dopage de silicium de haute qualité.



## CONFÉRENCE CYCLOPE MARDI 22 MARS 2011 À L'INSTN

Par Kirone Mallick, physicien à l'Institut de Physique Théorique, centre CEA de Saclay.

# Les émerveillements d'un théoricien

**Quel métier exercez-vous ?**

**Kirone Mallick :** Je suis physicien au CEA.

**Sur quoi portent vos travaux : les lasers ?**

**Les atomes ? Quelles expériences faites-vous ?**

**K.M. :** En vérité, je ne fais pas de manip'. Mon laboratoire est spécialisé en physique théorique. Mes collègues et moi faisons partie d'une étrange engeance qu'on appelle les "théoriciens".

**Certes, mais cela ne m'éclaire guère. En arrivant au bureau le matin, que faites-vous exactement ?**

**K.M. :** On pourrait dire que je cherche à décrire la manière dont certains phénomènes du monde réel se reflètent dans l'univers des mathématiques. Les théoriciens élaborent des modèles abstraits dont ils explorent

les propriétés. Si le modèle est juste, ses propriétés correspondent très précisément au monde qui nous entoure ; cela permet parfois de prédire des phénomènes avant même qu'ils ne soient observés dans une expérience.

**Donc vous êtes mathématicien ?**

**K.M. :** Non. Un mathématicien étudie en général les mathématiques pour elles-mêmes. Un physicien théoricien recherche les Lois universelles de la nature. Depuis Galilée, nous avons appris que le Livre de la Nature s'écrit avec des Nombres. Un théoricien cherche donc à décrypter ce Livre... ou à l'écrire.

**Pourriez-vous être plus précis ?**

**K.M. :** La physique théorique nous dévoile des correspondances intimes entre les choses et leur unité secrète. Je pourrai vous dire

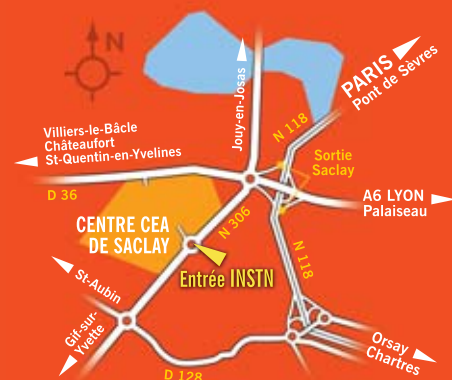
### INFOS PRATIQUES

**Accès /** ouvert à tous, entrée gratuite.

**Lieu /** Institut national des sciences et techniques nucléaires. Entrée Est du centre (voir plan d'accès ci-dessous).

**Date et heure /** mardi 22 mars 2011 à 20 heures.

**Organisation et renseignements /** Centre CEA de Saclay, Unité communication. Tél. 01 69 08 52 10. Adresse postale : 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.



comment entendre les atomes tels des notes de musique, vous amener à comprendre la Relativité comme un changement de perspective en peinture. Je représenterai un matériau aimanté comme un jeu de dames et une protéine comme un marcheur ivre... J'aimerais vous faire ressentir l'émerveillement que procure la physique théorique grâce à ses concepts élégants, profonds et souvent étonnamment simples.

Pour en savoir plus : <http://ipht.cea.fr>

