

AALS

Le magazine de l'Académie
Lorraine des Sciences

Mag

Numéro 1 - Déc 2009



Dossier

**Enquête
au cœur
de la matière...
ou du système
solaire ?**

Article

**Soigner les anévrismes grâce
aux technologies numériques**

Article

**Pourquoi le Génie des Procédés
intéresse-t-il tant ?**

A**L****S***Le magazine de l'Académie
Lorraine des Sciences***Mag****« Mettre
en lumière
les progrès
des Sciences,
aider à leur
diffusion
et participer
ainsi à leur
rayonnement »**

Editorial

**S'engager
dans la réalisation
d'un magazine
est un projet
ambitieux.**

Il est né de la vocation à diffuser les sciences, qui est la raison d'être de notre Académie. En effet la Société des Sciences de Nancy (ancienne dénomination de l'actuelle Académie Lorraine des Sciences) affichait en l'article 3 de ses statuts déposés à Nancy le 10 mars 1873 : « la Société a pour but les progrès et la diffusion des sciences mathématiques, physiques et naturelles dans toutes leurs branches théoriques et appliquées ».

Cette ambition nous a conduits à faire vivre notre site Internet. Cependant, même à l'heure de ces nouvelles techniques de communication, il nous a semblé utile de créer un lien concret avec tous les acteurs de la société et contribuer à leur information dans les domaines de l'actualité scientifique.

Le Conseil d'administration a mandaté une petite équipe choisie parmi ses membres pour illustrer par quelques articles des exemples de recherches diverses et pointues.

Ces articles ont pour support les travaux des chercheurs qui sont aussi les rédacteurs des textes. Ils n'ont d'autre ambition que de mettre en lumière leur domaine d'activité et de vous faire partager pendant quelques instants leur passion.

Nous espérons contribuer ainsi à votre information scientifique et à mieux vous faire connaître les buts que nous poursuivons.

Excellente lecture !

Colette Keller-Didier

Présidente de l'Académie Lorraine des Sciences

- **Directrice de la Publication** : Colette Keller-Didier ● **Comité éditorial** : Bernard Poty, Pierre Boyer, Bernard Chollot, André Clément, Jean-Paul Haton, Jean-Pierre Jolas, Jean-François Pierre, Jean-Marie Schissler.
- **Ont participé à ce numéro** : Bernard Poty, Bernard Chollot, Jean-Paul Haton. ● **Suivi rédactionnel, interviews** : Valéry Dubois / Image Clé ● **Création graphique** : Denis Mattioli / Studio Tapage ● **Crédit photos** : fotolia
- **Impression** : Socosprint ● **Contact** : als@uhp-nancy.fr ● **Site** : <http://www.als.uhp-nancy.fr> ● **ISSN** 1635-8597

Sommaire



Soigner les anévrismes grâce aux technologies numériques

Les progrès récents de l'imagerie numérique permettent aujourd'hui de voir fonctionner le cerveau, d'en explorer ses vaisseaux et, pour les anomalies, de repérer certaines des anomalies constatées avec beaucoup moins de risques qu'auparavant. Des simulateurs sont imaginés à Nancy, pour permettre aux praticiens de choisir au mieux leurs outils d'intervention et d'affiner leur geste.

Les Français, parmi les pionniers de la neuro-radiologie interventionnelle, continuent d'innover...

P.04

Article de René Anxionnat

- « Nous traitons à Nancy 200 anévrismes par an » 6
- Rencontre avec René Anxionnat 7
- Voir le cerveau : du temps des dissections à celui de l'imagerie numérique... 8



Pourquoi le Génie des procédés intéresse-t-il tant ?

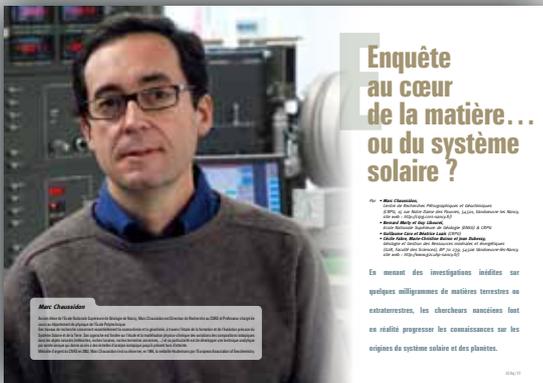
Le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) est une unité propre du CNRS. Ses champs de compétence sont le génie de la réaction chimique et des réacteurs, le génie biochimique et le génie des séparations et transferts avec des applications dans les domaines de la qualité, la sécurité, l'environnement et l'économie d'énergie.

Industrie de la pharmacie, de l'agroalimentaire, du secteur des déchets, de la cosmétique : si toutes ces industries sont partenaires du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, c'est que ses domaines de recherche sont très proches des nouveaux enjeux de société.

P.10

Article de Michel Fick

- Les produits alimentaires 12
- Rencontre avec Michel Fick 13
- Les nouveaux médicaments 14



Enquête au cœur de la matière... ou du système solaire ?

En mesurant des investigations inédites sur quelques milligrammes de matières terrestres ou extraterrestres, les chercheurs nancéiens font en réalité progresser les connaissances sur les origines du système solaire et des planètes.

P.16

Article de Marc Chaussidon

- Les origines du système solaire 18
- Rencontre avec Marc Chaussidon 19
- Les spécificités nancéiennes dans l'étude des échantillons 20
- L'exploration géologique de Mars 22
- Quelques résultats scientifiques emblématiques 24
- Processus nébulaires 26
- Evolution planétaire précoce 28

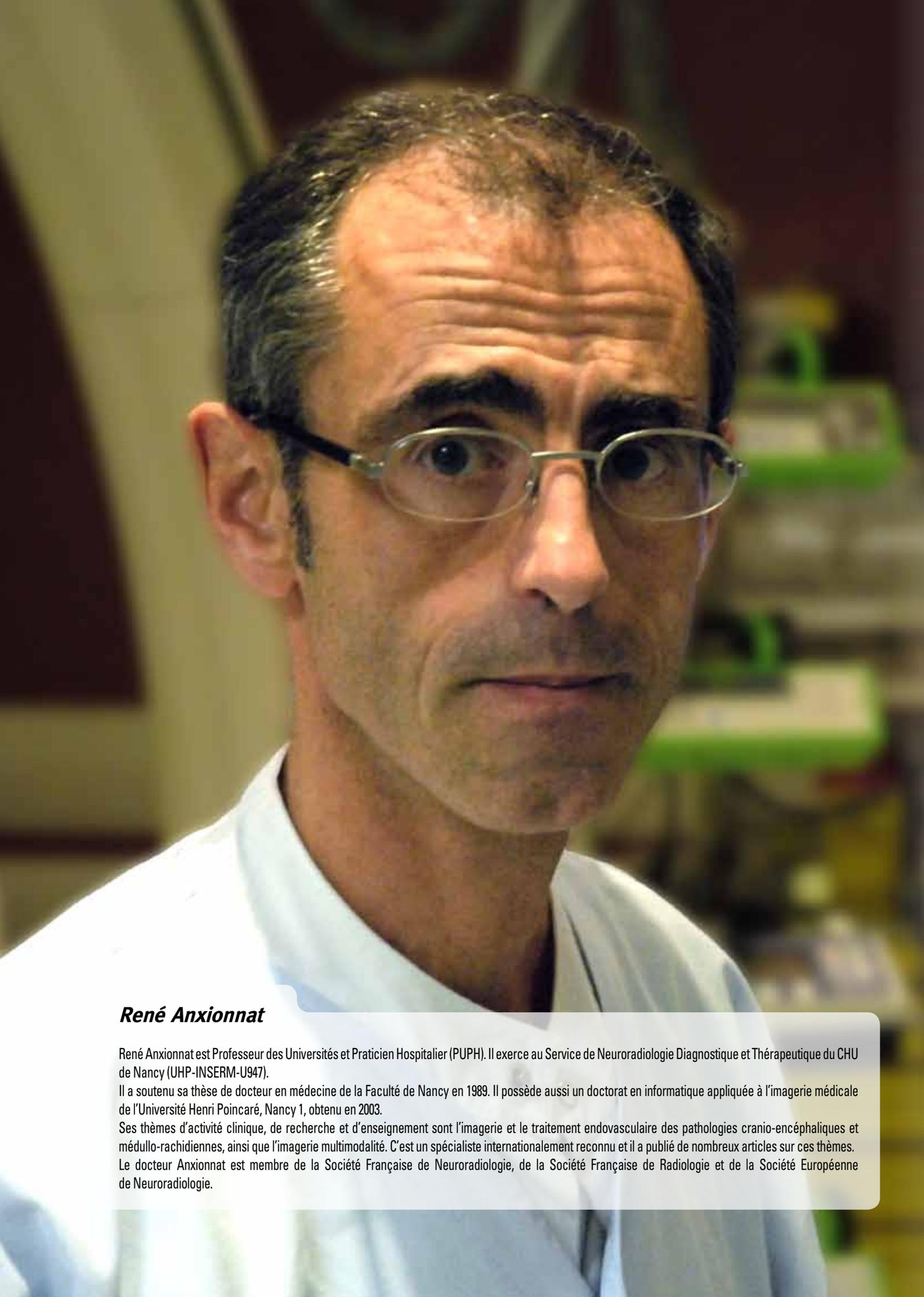


P.30

Analyse d'ouvrages

- Connaître et Protéger les Chauves-souris de Lorraine 30
- Archéologie des enceintes urbaines et de leurs abords en Lorraine et en Alsace (XII- XVe siècle). 31





René Anxionnat

René Anxionnat est Professeur des Universités et Praticien Hospitalier (PUPH). Il exerce au Service de Neuroradiologie Diagnostique et Thérapeutique du CHU de Nancy (UHP-INSERM-U947).

Il a soutenu sa thèse de docteur en médecine de la Faculté de Nancy en 1989. Il possède aussi un doctorat en informatique appliquée à l'imagerie médicale de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, obtenu en 2003.

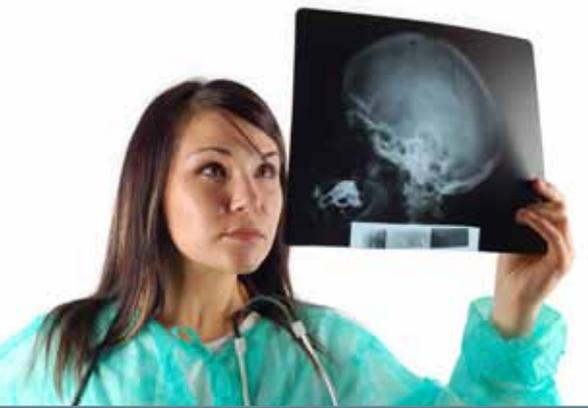
Ses thèmes d'activité clinique, de recherche et d'enseignement sont l'imagerie et le traitement endovasculaire des pathologies cranio-encéphaliques et médullo-rachidiennes, ainsi que l'imagerie multimodalité. C'est un spécialiste internationalement reconnu et il a publié de nombreux articles sur ces thèmes. Le docteur Anxionnat est membre de la Société Française de Neuroradiologie, de la Société Française de Radiologie et de la Société Européenne de Neuroradiologie.

Soigner les anévrismes grâce aux technologies numériques

Les progrès fulgurants de l'imagerie numérique permettent aujourd'hui de voir fonctionner le cerveau, d'en explorer ses vaisseaux et, pour les neuroradiologues, de réparer certaines des anomalies constatées avec beaucoup moins de risques qu'auparavant.

Des simulateurs sont imaginés à Nancy, pour permettre aux praticiens de choisir au mieux leurs outils d'intervention et d'affiner leur gestuelle.

Les Français, parmi les pionniers de la neuroradiologie interventionnelle, continuent d'innover...



Nous traitons à Nancy 200 anévrismes par an

Il y a douze ans, à Nancy, était installé dans les locaux du CHU le premier appareil au monde capable de délivrer cette vision en trois dimensions des vaisseaux sanguins de notre cerveau. Depuis, cette image a fait le tour du monde. Elle nous est commune.

Mais c'est effectivement dans le service de neuroradiologie diagnostique et thérapeutique de Nancy, dirigé à l'époque par le Pr Luc Picard, que fut réalisée, en conditions cliniques, la première angiographie 3D et que les premiers patients purent en bénéficier. Impossible d'imaginer, aujourd'hui, traiter un anévrisme sans angiographie 3D.

L'exploration tridimensionnelle de ces vaisseaux dont le diamètre est de l'ordre de 200 microns a permis depuis 1997 de faire progresser la fabrication des microcathéters, qui sont de plus en plus en plus fins et performants.

Ces microcathéters peuvent naviguer à l'aide de microguides dans des vaisseaux cérébraux de tailles inframillimétriques. Les avancées des matériaux d'occlusion, d'embolisation, de dilatation ou de désobstruction permettent de traiter une grande variété de lésions avec plus de sécurité. Parallèlement, la compréhension des pathologies vasculaires cérébrales s'est améliorée, ce qui permet de mieux orienter les choix thérapeutiques. Et la révolution numérique s'est poursuivie... et même amplifiée.

Au rythme de quasiment une opération par jour, le service de Neuroradiologie Diagnostique et Thérapeutique, dans lequel exerce René Anxionnat, a eu l'occasion d'affiner ses pratiques et ses connaissances de l'anévrisme au cours des années.

La rupture d'anévrisme intracrânien (Fig 1) est une pathologie grave et fréquente qui nécessite une prise en charge urgente. L'occlusion de l'anévrisme rompu, donc extrêmement fragile, est indispensable pour éviter une nouvelle rupture aux conséquences cliniques gravissimes. Cette occlusion, longtemps chirurgicale, est actuellement le plus souvent réalisée par voie endovasculaire. Par une simple ponction artérielle au pli de l'aîne, un microcathéter est guidé sous contrôle angiographique dans des vaisseaux dont la taille varie entre 2 et 4 mm jusqu'à la poche anévrismale. Cette poche est alors obstruée par des coils en platine (Fig 2). Ces coils ont l'apparence de petits ressorts extrêmement souples qui vont rester à demeure et être progressivement incorporés par la paroi vasculaire. Leur diamètre varie entre 1,5 et 20 mm, le choix étant adapté à la taille de l'anévrisme. Il est souvent nécessaire de placer plusieurs coils au sein de l'anévrisme pour l'occlure complètement (Fig 3).

3% des français sont porteurs d'anévrismes non rompus

À côté des anévrismes intracrâniens rompus, il est de plus en plus fréquent de mettre en évidence, grâce à des examens d'imagerie, des anévrismes non rompus, souvent découverts par hasard. La fréquence de ces anévrismes non rompus dans la population générale est estimée à environ 3%.

D'après les données récentes de la littérature médicale, le risque hémorragique de la plupart de ces anévrismes est faible et dépend notamment de leur taille et de leur localisation. Dans chaque

cas, les avantages et les risques du traitement doivent donc être soigneusement pesés et expliqués clairement au patient. Si certains de ces anévrismes découverts fortuitement doivent être traités, beaucoup ne nécessitent qu'une simple surveillance en imagerie.

L'urgence... en cas d'accident vasculaire !

L'accident vasculaire cérébral est une source importante de handicap. Il est le plus souvent dû à l'obstruction brutale d'une artère cérébrale ayant pour conséquence un défaut d'alimentation d'une partie du cerveau (Fig 4). Cela se traduit le plus souvent par la paralysie d'un héli-corps. Cette paralysie qui risque d'être définitive peut être améliorée en rétablissant rapidement la circulation dans l'artère obstruée. En pratique l'obstruction doit être levée dans les 3 à 4 premières heures c'est à dire avant l'installation de lésions cérébrales irréversibles. Dans ce court intervalle de temps, le patient doit être adressé dans une unité neurovasculaire qui pratique ces désobstructions appelées thrombolyse. Il y sera examiné, passera une IRM et si l'indication se confirme, sera traité par thrombolyse (La thrombolyse consiste à désagréger les caillots qui obstruent les vaisseaux sanguins).

Le raccourci « time is brain » rend bien compte de l'importance de l'organisation du circuit du patient de façon à aller le plus vite possible. La thrombolyse peut être réalisée par voie veineuse ou, dans certains centres hautement spécialisés comme Nancy, par voie artérielle. L'indication de l'une ou l'autre technique dépend, notamment, de la localisation de l'obstruction et de son étendue. Cette désobstruction est obtenue par des moyens chimiques ou par des outils mécaniques qui sont introduits par voie endovasculaire au niveau du caillot par l'intermédiaire d'un microcathéter (Fig 5).

Rencontre avec René Anxionnat

Propos recueillis par
Valéry DUBOIS / Image Clé

Service de Neuroradiologie Diagnostique et Thérapeutique - CHU de Nancy



Fig 1 - Anévrisme rompu (angiographie)



Fig 2 - Anévrisme obstrué par un coil de Platine



Fig 3 - Anévrisme traité (obstrué par un coil)

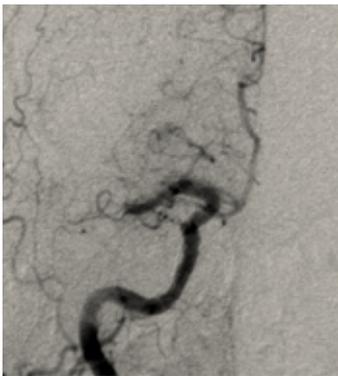
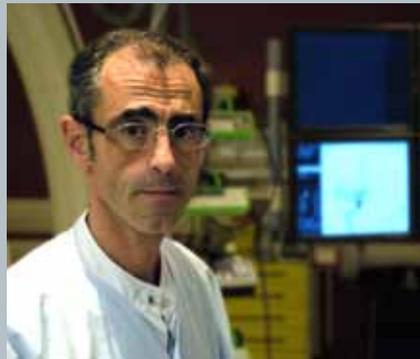


Fig 4 - Artère cérébrale moyenne obstruée (AVC)



Fig 5 - Désobstruction de l'artère



Valéry DUBOIS, Image Clé

Valéry Dubois : Malgré le déploiement toujours plus important des technologies, le geste du praticien semble toujours être un élément incontournable du dispositif de traitement des anévrismes. Pourquoi ?

René Anxionnat : L'évolution des technologies met à notre disposition des images de plus en plus précises, indispensables au diagnostic et tout à fait nécessaires lors d'une intervention. Mais ensuite il y a les traitements, c'est de la neuroradiologie thérapeutique. Nous guidons les cathéters manuellement, ce qui réclame une grande précision. Nous les dirigeons à l'intérieur des vaisseaux, il y a donc un grand nombre de bifurcations. Ce sont des traitements peu invasifs mais qui réclament une dextérité et une pratique importantes, soit des années d'apprentissage. Généralement, nous partons du pli de l'aîne pour remonter tout le système vasculaire, pour enfin arriver dans le cerveau, dans ces petits vaisseaux qui font jusqu'à 200 microns. Au niveau du cerveau, la moindre erreur de manipulation peut conduire à des complications très graves. Avant, on apprenait à manier ces cathéters en faisant des angiographies. Or, maintenant, tous les examens vasculaires réalisés pour établir un diagnostic se font par scanner ou I.R.M., sans manipulation de cathéter. Et donc les neuroradiologues interventionnels n'ont plus cette phase d'apprentissage qui leur permettait doucement d'aller vers le maniement des microcathéters. Pour le maniement des cathéters, plus l'on en manie plus on est habile.

VD : D'où l'intérêt de mettre au point des simulateurs. Vous vous êtes rapproché pour cela de spécialistes de l'informatique ?

RA : Je travaille effectivement à Nancy avec l'équipe Magrit Loria - INRIA Nancy Grand Est : Marie-Odile Berger, Erwan Kerrien ainsi que l'équipe Alcove (INRIA Lille Nord Europe) pour simuler une intervention et notamment la mise en place des coils dans un anévrisme (fil de platine destiné à remplir l'anévrisme pour l'oblitérer). Pour l'instant, nous travaillons sur des simulateurs visuels uniquement mais à partir de véritables anévrismes. L'image est en trois dimensions dans le logiciel. Ensuite nous allons choisir le coil et observer la façon dont il se déploie à l'intérieur de l'anévrisme, s'il flotte ou si au contraire il va pousser trop fort sur les parois. On peut décider de modéliser les zones de pression sur la paroi du vaisseau. Le stade suivant serait de proposer la connexion du logiciel à des cathéters pour apprendre à manipuler. Les jeunes neuroradiologues français qui se destinent à la neuroradiologie interventionnelle vont pouvoir prochainement s'entraîner sur des simulateurs de ce type dans le cadre de programmes de formation mis en place par la société française de neuroradiologie. Ces simulateurs doivent toutefois évoluer pour être le plus réaliste possible et s'adapter aux innovations technologiques.

VD : Je crois savoir que vous avez par ailleurs rédigé une thèse en collaboration avec l'INRIA ?

RA : J'ai effectivement travaillé sur la modélisation 3D des malformations artério-veineuses avec l'objectif d'améliorer le traitement par radiothérapie et disposer d'une analyse tridimensionnelle précise. Il fallait s'appuyer pour cela sur les techniques d'analyses tridimensionnelles qui ont été mises au point à Nancy et qui permettent d'identifier plus clairement la cible, avec une meilleure efficacité et moins de risques. Ces collaborations entre informaticiens et médecins nécessitent des efforts de part et d'autre pour bien définir les problèmes et essayer de les résoudre mais au final ce rapprochement est particulièrement enrichissant à la fois pour les médecins et pour les informaticiens dans un objectif d'amélioration des soins au patient.

Voir le cerveau : du temps des dissections à celui de l'imagerie numérique.

Les études anatomiques portant sur des dissections ont longtemps été le seul moyen de voir dans le cerveau et d'obtenir des descriptions très précises de la surface corticale et de la structure interne.

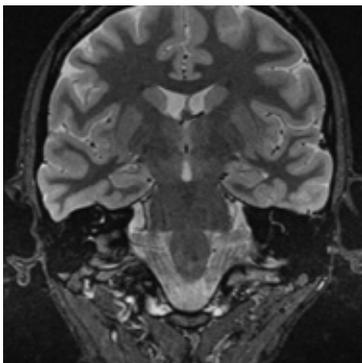


Fig 1 - Coupe du cerveau en IRM

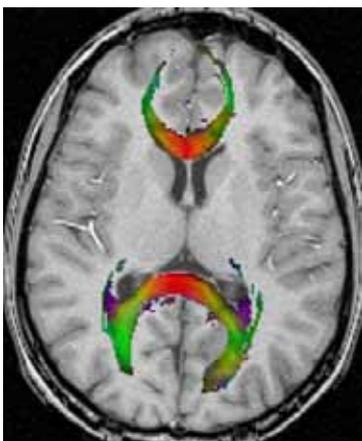


Fig 2a - Faisceaux de substance blanche

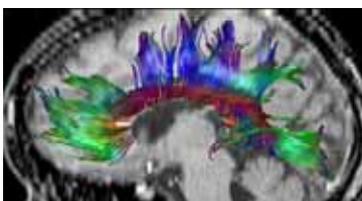


Fig 2b - Faisceaux de substance blanche

Ce n'est qu'au 20ème siècle qu'ont été développées des techniques d'imagerie permettant de voir dans le cerveau sans « ouvrir la boîte crânienne ». Les premières méthodes d'imagerie étaient basées sur l'utilisation des RX et ont donné leur nom à la radiologie, discipline médicale qui permet de visualiser les éléments du corps humain.

Les premières méthodes étaient indirectes et ne donnaient qu'une vision très partielle mais qui permettait de faire des diagnostics et de traiter des patients. Ces techniques consistaient en fait à visualiser, soit les vaisseaux tissant une maille vasculaire serrée autour du cerveau, soit les espaces liquidiens recouvrant le cerveau et s'insinuant jusque dans ses replis.

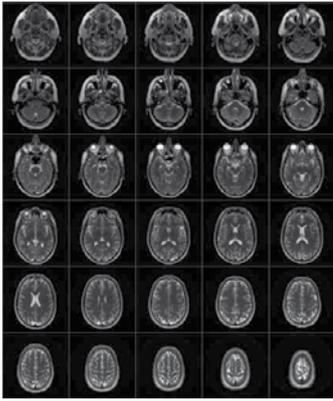
Les lésions cérébrales étaient donc localisées par les déformations qu'elles exerçaient sur ces vaisseaux ou ces espaces liquidiens, l'information sur la nature de la lésion était cependant nécessairement limitée et certaines lésions trop petites ou n'entraînant pas de déformations n'étaient pas détectées. La technique de visualisation des vaisseaux cérébraux appelée angiographie et développée dans les années 30 consiste à visualiser de façon dynamique par RX la circulation d'un produit de contraste iodé radio opaque à l'intérieur de ces vaisseaux. Ce produit de contraste est injecté par un tube souple et fin appelé cathéter qui est introduit dans la circulation artérielle en ponctionnant l'artère fémorale. Ce cathéter radio-opaque est ensuite guidé manuellement sous contrôle radioscopique jusqu'à la partie du corps que l'on veut explorer, par exemple dans les artères carotides pour étudier le cerveau. Grâce aux progrès technologiques de ces dernières années qui ont permis de miniaturiser ces cathéters, il est désormais possible de naviguer de plus en plus loin jusque dans les vaisseaux cérébraux.

L'invention du scanner

Le scanner est mis au point par Hounsfield ingénieur de la firme EMI en 1971, firme qui pour la petite histoire commercialisait les Beatles. Cette technique, qui a donc moins de 40 ans, a révolutionné l'imagerie médicale en montrant directement le cerveau en coupes. Les premiers scanners permettaient d'obtenir des coupes épaisses d'environ 1 cm en plusieurs minutes alors que les appareils de dernière génération explorent en quelques secondes l'encéphale en coupes infra-millimétriques.

Années 80 : la révolution IRM

Dans les années 80, l'IRM a permis de franchir une nouvelle étape dans l'exploration du cerveau. Alors que le scanner et l'angiographie mesurent l'absorption des rayons X, l'IRM ou imagerie par résonance magnétique repose sur un principe physique totalement différent. L'IRM est un aimant puissant, 10 000 fois plus puissant que le champ magnétique terrestre qui permet grâce à l'émission d'ondes radiofréquences de différencier les structures cérébrales. L'engouement pour l'IRM s'explique par son caractère non irradiant et par la précision des images obtenues qui ressemblent à de véritables coupes anatomiques (fig 1). Il est possible d'obtenir des acquisitions volumiques du cerveau et de ses vaisseaux puis de les analyser dans tous les plans avec une résolution infra millimétrique. Augmenter la puissance du champ magnétique permet de réaliser des coupes de plus en plus fines, les appareils fonctionnant à très haut champ ont une résolution de l'ordre de 200 microns qui leur permet de distinguer les différentes couches du cortex. Ces appareils à très haut champ restent actuellement encore du domaine de la recherche.



Mais l'IRM va bien au-delà d'une simple imagerie anatomique. Elle permet en effet d'étudier le fonctionnement cérébral avec ses circuits.

L'étude des déplacements des molécules d'eau en imagerie de diffusion permet de suivre et de tracer grâce à des logiciels complexes les faisceaux de substance blanche qui relient entre elles les différentes structures corticales (fig 2a, 2b). L'imagerie de diffusion permet également de détecter les signes d'œdème très précoce d'un accident vasculaire ischémique.

L'imagerie d'activation montre l'activation des zones corticales lors de la réalisation de tâches visuelles, auditives, motrices comme bouger un doigt, ou plus élaborées comme le langage, le calcul, la mémorisation. En ce sens l'IRM d'activation nous renseigne sur le fonctionnement cérébral à l'échelle de groupes de neurones et nous a permis une meilleure compréhension de ce fonctionnement en condition normale et pathologique. L'IRM d'activation est un domaine de recherche actif. Elle est également utilisée en clinique pour renseigner le chirurgien sur la localisation précise des aires fonctionnelles par rapport à une lésion tumorale dont il doit faire l'exérèse.

Enfin l'imagerie de perfusion explore la vascularisation au niveau capillaire et permet notamment de rechercher des zones anormales hypo ou hyper-perfusées notamment dans les pathologies vasculaires ischémiques et tumorales.

Cette dimension « fonctionnelle » de l'IRM a permis ces 10 dernières années d'améliorer considérablement notre connaissance du fonctionnement cérébral dans les conditions normales et pathologiques. Elle est non seulement un domaine de recherche actif mais elle fait aussi partie intégrante des examens cliniques de routine et joue un rôle de plus en plus important dans nos décisions thérapeutiques.

Explorer le cerveau et le réparer

Les avancées du scanner et de l'IRM permettent désormais d'explorer les vaisseaux cérébraux de façon très précise et beaucoup moins traumatique que l'angiographie conventionnelle. L'angiographie n'a donc pratiquement plus d'indication à visée diagnostique et c'est par exemple en angio-scanner ou en angio-IRM qu'actuellement sont recherchés les anévrysmes intracrâniens ou les rétrécissements artériels.

Mais si l'angiographie conventionnelle n'a pratiquement plus d'indication pour le diagnostic, en revanche ces vingt dernières années ont connu un considérable essor des techniques de traitement endovasculaire qui utilisent l'angiographie comme moyen de naviguer à l'intérieur des vaisseaux pour venir les « réparer » sur place. Ces techniques ont peu à peu supplanté la plupart des interventions neurochirurgicales vasculaires qui nécessitaient l'ouverture de la boîte crânienne pour avoir accès aux vaisseaux.

Les progrès rapides de l'IRM permettent d'espérer voir des structures cérébrales de plus en plus petites et pouvoir par exemple étudier l'organisation corticale. À l'ère des nanotechnologies, il est probable que les innovations technologiques permettront d'améliorer encore la miniaturisation et la sécurité des systèmes de navigation et de traitement endovasculaires. Il sera ainsi possible de cibler plus précisément les traitements dans un environnement d'imagerie multimodalités.





Michel Fick

Michel Fick est Professeur des Universités en génie des procédés à l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), et plus particulièrement à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA), Ecole qu'il dirige depuis mars 2007.

Il a soutenu sa thèse de doctorat à l'INPL en 1987. Ses activités de recherche sont réalisées au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC), unité propre du CNRS dont le centre de gravité se situe à l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC) et dont la partie biotechnologique et alimentaire est développée à l'ENSAIA.

Les travaux de Michel Fick portent sur la cinétique, la modélisation et la mise en œuvre de procédés biotechnologiques et alimentaires, avec une attention marquée sur les systèmes de dépollution connectés à l'activité des industries alimentaires.

Pourquoi le Génie des procédés intéresse-t-il tant ?

Michel Fick, Isabelle Chevalot et Annie Marc

Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, UPR CNRS 6811

Groupe ENSIC, BP 451, 54001 Nancy cedex

<http://www.ensic.inpl-nancy.fr/LSGC/>

Le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (LSGC) est une unité propre du CNRS. Ses champs de compétence sont le génie de la réaction chimique et des réacteurs, le génie biochimique et le génie des séparations et transferts avec des applications dans les domaines de la qualité, la sécurité, l'environnement et l'économie d'énergie.

Industriels de la pharmacie, de l'agroalimentaire, du secteur des déchets, de la cosmétique : si toutes ces industries sont partenaires du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, c'est que ses domaines de recherche sont très proches des nouveaux enjeux de société.



Les produits alimentaires

Les fabricants de malt pourraient bientôt réduire leur consommation d'eau, jusqu'à la diviser par deux, les industries pharmaceutiques remplacer les protéines animales par des protéines d'origine végétale pour mettre au point les molécules thérapeutiques de demain, la cosmétique disposer de molécules plus actives.

Environnement, santé, alimentation : à Nancy, le génie des procédés développe des connaissances riches en applications.



Diviser par deux la consommation d'eau des fabricants de bière

La malterie est une industrie qui utilise de très grandes quantités d'eau pour la transformation de l'orge en malt. Les procédés industriels appellent des améliorations incessantes pour améliorer soit les rendements, soit les productivités.

Mais on peut aussi envisager une réduction des coûts en réduisant tout simplement l'apport en matières premières.

Le projet a donc consisté à travailler avec l'ensemble des malteurs français pour réduire significativement la quantité d'eau utilisée dans leurs procédés.

Car si la malterie utilise énormément d'eau, cette eau à l'issue du process est polluée par toute une série de molécules qui empêchent une réutilisation de l'eau en direct. On s'est rendu compte que ces molécules ont un effet inhibiteur sur la germination de l'orge. Dans la malterie, on fait germer l'orge et on stoppe la germination à un stade bien déterminé. Or, en recyclant l'eau en permanence, sans prendre de précautions, on assistait à une inhibition de la germination, il ne se passait plus rien.

Le travail des chercheurs du laboratoire a donc consisté à identifier les molécules inhibitrices, en l'occurrence des polyphénols de haut poids moléculaire, et à trouver un moyen de les dégrader par voie biologique. Au final, le laboratoire a mis au point une technologie qui permet de réduire jusqu'à 50 % la quantité d'eau utilisée dans les procédés en favorisant le recyclage de cette eau.

Le procédé consiste à coupler un fermenteur, dans lequel des micro-organismes dégradent ces molécules inhibitrices, à une microfiltration pour retenir les bactéries à l'intérieur du fermenteur. L'eau issue du process peut alors être recyclée. Le procédé fonctionne en laboratoire, il a été validé à l'échelle pilote et testé à l'échelle industrielle. Un enjeu qui concerne des millions de mètres cubes.

Améliorer les conditions de production du glutamate, un fameux exhausteur de goût...

Le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique dispose d'une expertise avérée dans le domaine de la production d'acide glutamique, un exhausteur de goût, qui est une molécule particulièrement répandue dans l'industrie agroalimentaire.

C'est le fameux goût de la sauce de soja... Cet acide glutamique est produit par une bactérie, *Corynebacterium glutamicum*, sur laquelle travaille le laboratoire depuis une vingtaine d'années. Cette bactérie produit des quantités d'acide glutamique importantes, à des niveaux de 100 à 130 g par litre, ce qui est déjà beaucoup. Ainsi, pour aller plus loin et améliorer encore ce rendement, il fallait pénétrer à l'intérieur de la cellule et comprendre comment celle-ci fonctionne.

Les chercheurs ont fait appel à des outils de biologie moléculaire pour comprendre très finement comment l'acide glutamique s'échappe, passe les différentes barrières pour se retrouver à l'extérieur de la cellule. L'excrétion des produits au travers de la paroi des cellules est un problème récurrent qui limite les performances de nombreux procédés biotechnologiques, dont des procédés producteurs d'acides aminés. Une meilleure caractérisation de la paroi (protéomique et lipidique) constitue donc une stratégie de premier ordre pour comprendre les phénomènes physiologiques impliqués dans l'excrétion du glutamate et permettre d'améliorer les performances de la fermentation productrice de glutamate.

L'analyse de la composition en acides corynomycologiques des parois a permis de mettre en évidence d'importantes différences de production de glutamate suivant les conditions expérimentales, ce qui ouvre la voie à des améliorations de performances pour la production de cet exhausteur de goût.



Image Clé, Valéry DUBOIS

Rencontre avec Michel Fick

Propos recueillis par
Valéry DUBOIS / Image Clé

Directeur de l'ENSAIA - l'École nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires

Valéry Dubois : Le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique est un des grands laboratoires nancéiens. Il dispose d'une nouvelle plateforme d'expérimentation. De quoi s'agit-il ?

Michel Fick : Inaugurée fin 2009, nous disposons effectivement, sur l'ENSAIA, d'une plateforme dotée, entre autres, d'un nouveau système de chromatographie liquide associé à la spectrométrie de masse qui nous permettra de déterminer des molécules particulières et de les doser, avec des échelles de niveau de concentration extrêmement faibles.

Pour mener à bien nos recherches, nous avons besoin de doser finement des molécules assez variées. Naturellement, les équipements qui permettent cela sont très coûteux. Au niveau du laboratoire mais également de l'ENSAIA, nous travaillons de plus en plus sur des plateformes communes. Cette nouvelle plateforme permet à l'ensemble des laboratoires de l'école de bénéficier d'équipements de haut vol. Je crois que l'avenir est dans la mutualisation des moyens communs, lourds financièrement mais qui peuvent servir à plusieurs équipes ou à plusieurs laboratoires de recherche.

En utilisant des matériels de nos partenaires comme l'Institut Français de Brasserie Malterie (IFBM) qui est situé sur le plateau de Nancy-Brabois, nous pouvons travailler sur des mycotoxines, des toxines produites par des champignons, sur l'orge en particulier, avec une technicité, un niveau de dosage sans pareil au niveau européen.

Nous devons donc avoir sur place des équipes de recherche mais aussi des centres techniques qui ont de réelles expertises dans tous ces domaines. Nous investissons également dans des équipements de caractérisation de produits alimentaires, de physico-chimie des aliments avec des modules extrêmement précis pour déterminer la rhéologie des produits alimentaires, avec des matériels de dernière génération qui vont nous permettre de travailler de manière

beaucoup plus fine sur le matériau alimentaire. Tous ces équipements sont financés par les pouvoirs publics ou les collectivités locales qui nous aident dans ces investissements.

VD : On trouve au sein du laboratoire aussi bien des mathématiciens, que des physiciens, des biologistes. Qu'est-ce qui, selon vous, justifie une telle mixité ?

MF : Le Laboratoire des Sciences du Génie Chimique emploie plus de 200 personnes, avec une spécificité dans le domaine du génie des procédés qui est une science très fortement développée en France. Il y a deux ou trois pôles importants en France, dont celui de Nancy. C'est un laboratoire qui travaille aussi bien sur des procédés chimiques que sur des procédés biotechnologiques.

Les résultats que nous allons présenter ici se focalisent davantage sur le Génie des Procédés Biotechnologiques Alimentaires (GBPA) avec un groupe d'une trentaine de personnes qui travaille sur la mise en oeuvre de procédés liés à ces disciplines scientifiques.

C'est un groupe qui est particulier parce qu'il dispose de compétences aussi bien en biologie fondamentale qu'en mise en oeuvre de procédés. On a donc un mélange un peu particulier, un peu ésotérique, de biologie, de mathématiques, de physique ce qui nous fait souvent dire que cette équipe se trouve dans une position très intermédiaire. Nous avons besoin de double compétences avec des recrutements de chercheurs plutôt orientés vers la biologie et d'autres plutôt orientés vers la physique.

VD : Et comment se font ces « passages », se vit cette communication entre chercheurs ?

MF : Je pense que le chercheur doit avoir la capacité d'ouverture nécessaire pour s'ouvrir à d'autres sciences et donc les biologistes purs et durs doivent faire des efforts pour s'adapter aux

contraintes des procédés et inversement : les spécialistes des procédés doivent s'ouvrir à la biologie. Au bout d'un certain temps, nous devenons tous capables d'échanger. C'est un peu la richesse aussi de ce laboratoire : la diversité des compétences nécessaires pour la mise en oeuvre des projets.

VD : Votre métier a changé ?

MF : On se rend compte depuis une vingtaine d'années que le chercheur est devenu aussi quelque part un commercial. Il faut qu'il communique davantage, qu'il se vende, qu'il aille chercher des financements. Donc il y a une part importante du travail qui consiste à aller chercher ces financements complètement indispensables à la mise en oeuvre des sujets de recherche.

Le côté positif de l'évolution c'est peut-être l'obligation pour nous de travailler en petites équipes extrêmement ouvertes, ouvertes aux autres et en particulier ouvertes à la constitution de réseaux nationaux et internationaux pour bénéficier des compétences qui se trouvent un peu partout dans le monde. L'amélioration de la communication au sens large, comme via Internet, nous a permis de gagner beaucoup de temps sur la mise en oeuvre de projets importants sur le plan international.

Sachant que nous touchons effectivement des domaines assez variés. La biotechnologie au sens large concerne la santé, l'alimentation, le traitement de déchets. Donc, c'est extrêmement large. Et nous voyons que dans chacun de ces secteurs, nous avons des enjeux forts. Dans le domaine de la santé, la biotechnologie s'intéresse aux médicaments de demain, comment les produire ? Comment trouver les bons procédés pour réduire le plus possible les pollutions que nous pouvons engendrer ? Comment utiliser au mieux les éco-produits ? Beaucoup d'enjeux de la société actuelle, finalement, avec l'idée d'améliorer les conditions de vie futures.

Les nouveaux médicaments



Fabriquer différemment les molécules thérapeutiques de demain

Les enjeux qui poussent les industriels de la pharmacie à se rapprocher des spécialistes du Génie des Procédés sont clairs : optimiser les conditions de production des molécules thérapeutiques de demain.

Et c'est justement le travail du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique qui dispose des équipes et des outils de haut vol pour le faire. Le laboratoire est pratiquement le seul en France à pouvoir utiliser des réacteurs de grand gabarit pour étudier la culture de cellules animales. Il possède en effet des réacteurs, appelés cytotraceurs, d'une vingtaine de litres plus volumineux que les réacteurs disponibles dans les laboratoires de recherche habituels. Auparavant, le problème que rencontraient les producteurs de cellules animales pour la production de médicaments était l'obligation d'incorporer dans les milieux de culture du sérum de veau foetal (SVF, sérum issu des fœtus de vache). Le coût était prohibitif et depuis le problème de la vache folle, l'industrie se méfie des sources de protéines animales.

Il y avait donc un grand enjeu à remplacer ce sérum de veau foetal par des sources de protéines végétales de manière à totalement se libérer de cette contrainte.

L'une des alternatives à l'utilisation de molécules d'origine animale dans les milieux de culture consiste effectivement à utiliser des peptides issus de l'hydrolyse enzymatique de protéines végétales, dont il importe alors d'évaluer la capacité à subvenir aux besoins nutritionnels des cellules et de mieux comprendre leur utilisation par les cellules. Les chercheurs du laboratoire sont partis du constat qu'en Lorraine nous avons des tourteaux de colza riches en protéines. Différentes fractions, issues de l'hydrolyse enzymatique de tourteaux de colza



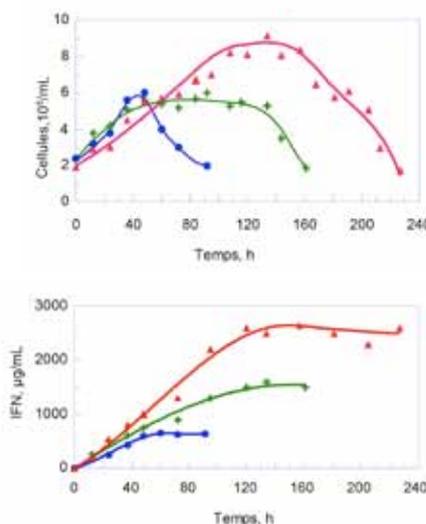
ont été comparées au cours de cultures de cellules. Les études ont mis en évidence une fraction permettant de ralentir la mort cellulaire et d'augmenter la densité cellulaire finale, tout en modifiant le métabolisme du glucose. Ces résultats ont été confirmés en bioréacteur où la concentration cellulaire a été triplée, la longévité de la culture doublée, et la concentration finale de la protéine quintuplée. La comparaison des performances en présence d'acides aminés libres suggère un double effet des peptides, de type nutritionnel et facteur de croissance. Une étape supplémentaire de sous-fractionnement par chromatographie liquide a permis de cibler un effet promoteur maximal pour des peptides de taille comprise entre 500 et 1000 Da.

En résumé, la démarche a donc consisté à traiter ces protéines de tourteaux de colza avec des enzymes pour les dégrader, former des peptides et des acides aminés qui ont ensuite été intégrés dans les milieux de culture de cellules animales pour vérifier s'ils pouvaient remplacer le sérum de veau foetal. Le laboratoire est arrivé à des résultats extrêmement intéressants puisque, dans certaines conditions, les performances constatées sont bien supérieures à celles habituellement rencontrées. Avec ce procédé, il est possible de se passer du sérum de veau foetal, de produire plus, plus vite et mieux les médicaments qui intéressent l'industrie pharmaceutique.

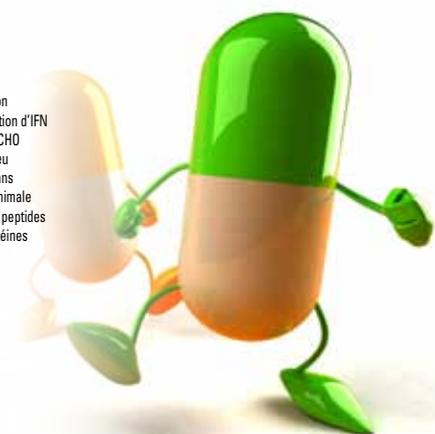
À partir de cette étude, l'équipe a depuis développé plusieurs axes de recherche :

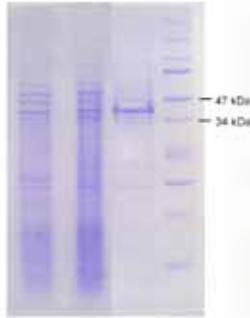
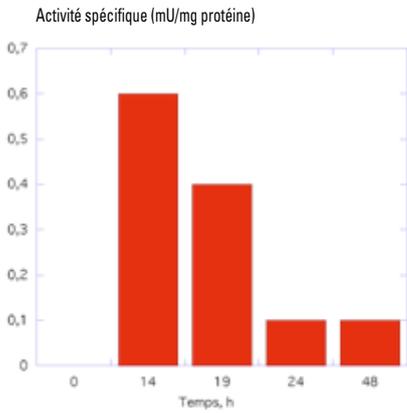
- concernant les enzymes, pour identifier quelles sont les meilleures enzymes à utiliser pour dégrader les protéines de colza
- concernant la caractérisation des peptides obtenus, puis l'incorporation de ces fractions peptidiques dans les milieux de culture et les essais sur des cellules cibles pour produire un médicament.

A partir d'un besoin exprimé par l'industrie, ce n'est pas un seul axe mais plusieurs axes de recherches qui ont ainsi été créés.



Intensification de la production d'IFN par cellules CHO dans un milieu de culture sans substance animale et enrichi en peptides issus de protéines de colza





Production et purification partielle de l'acide férulique estérase de *Streptomyces ambofaciens* : activité spécifique de l'enzyme au cours d'une culture en mode discontinu (a) et sa purification (b)

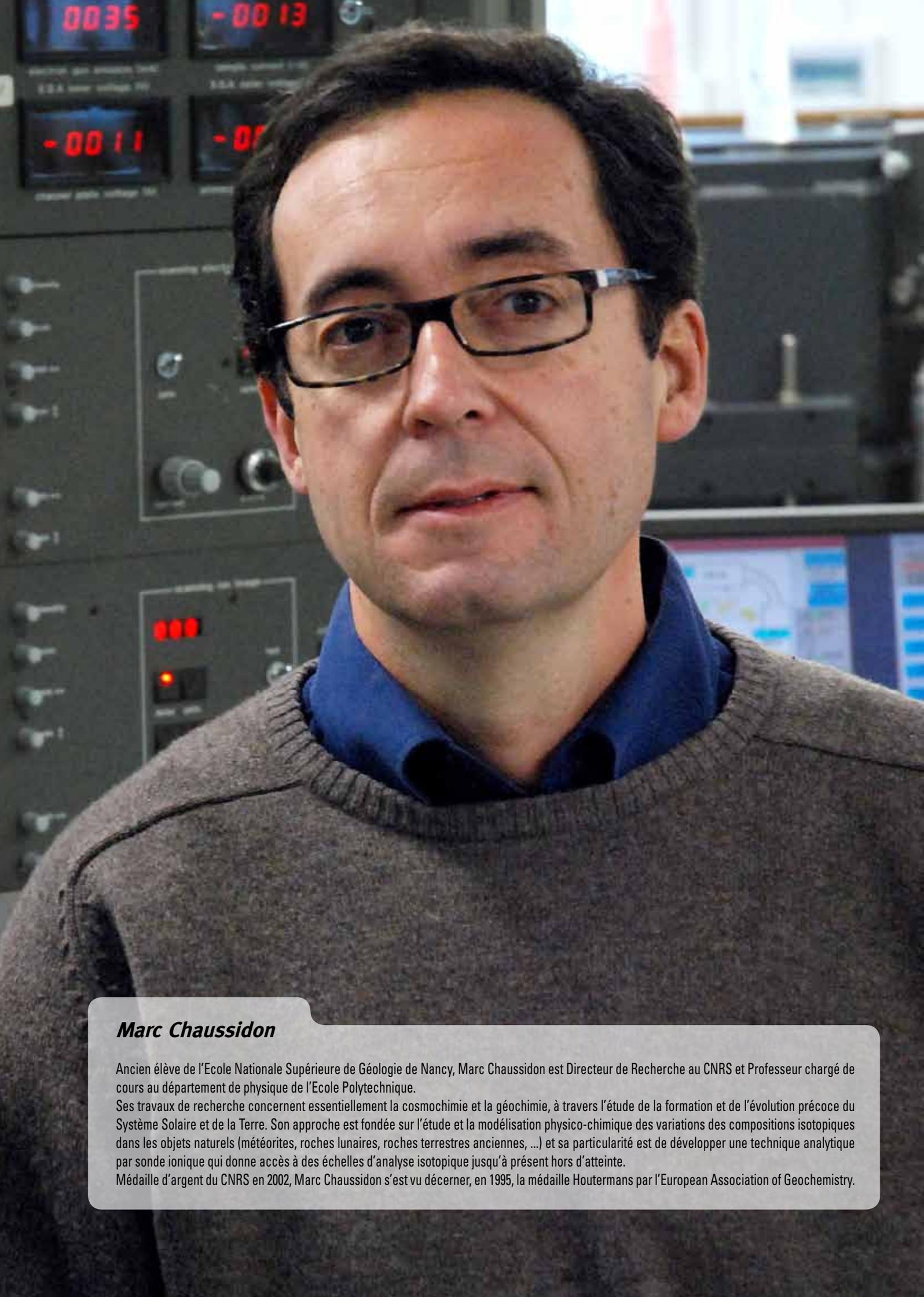
Des molécules aux nouvelles fonctionnalités

Afin de donner des fonctionnalités bien précises aux molécules utilisées dans les domaines de la nutrition-santé ou des cosmétiques, la recherche en Génie des Procédés Biologiques réalise un important travail de sélection de molécules et d'enzymes. En utilisant de nouveaux biocatalyseurs enzymatiques, une molécule aux propriétés jugées intéressantes sera ainsi associée à une autre molécule pour former une nouvelle entité plus active, capable de passer des barrières qui seraient sinon restées infranchissables, comme par exemple les parois intestinales lorsqu'il s'agit d'un médicament. Ce travail de sélection et d'association réclame de la part des équipes du laboratoire un nombre important de tests, pour vérifier l'efficacité des biocatalyseurs, des molécules et l'intérêt des résultats obtenus. Le choix des milieux réactionnels à utiliser est également déterminant (solvants...). Des moyens d'analyse extrêmement précis doivent naturellement être mobilisés pour vérifier que les molécules nouvellement créées présentent bel et bien les fonctionnalités souhaitées. Ces procédés d'obtention de catalyseurs enzymatiques spécifiques représentent un champ important de la recherche au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique.

Le groupe de Génie des Procédés Biotechnologiques et Alimentaires (GPBA) est l'un des 7 groupes du LSGC ; il développe des méthodes génériques autour de :

- la maîtrise de diverses technologies et mise en œuvre de bioréacteurs
- l'étude de leur hydrodynamique par simulation numérique et mesures expérimentales
- diverses approches de modélisation des bioprocédés étudiés
- l'optimisation de la mise en œuvre des expérimentations et de leurs performances ainsi que le contrôle des bioprocédés
- la mise au point et l'utilisation de techniques analytiques spécifiques. Pour atteindre ces objectifs et mieux maîtriser les phénomènes et processus mis en jeu, les études s'appuient sur une approche multi échelles
- l'échelle intracellulaire pour la compréhension des mécanismes physiologiques
- l'échelle du catalyseur, pour l'étude du couplage entre le catalyseur et son environnement physico-chimique et biologique
- l'échelle du procédé, pour la conception technologique, la maîtrise et l'optimisation des conditions opératoires.





Marc Chaussidon

Ancien élève de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, Marc Chaussidon est Directeur de Recherche au CNRS et Professeur chargé de cours au département de physique de l'Ecole Polytechnique.

Ses travaux de recherche concernent essentiellement la cosmochimie et la géochimie, à travers l'étude de la formation et de l'évolution précoce du Système Solaire et de la Terre. Son approche est fondée sur l'étude et la modélisation physico-chimique des variations des compositions isotopiques dans les objets naturels (météorites, roches lunaires, roches terrestres anciennes, ...) et sa particularité est de développer une technique analytique par sonde ionique qui donne accès à des échelles d'analyse isotopique jusqu'à présent hors d'atteinte.

Médaille d'argent du CNRS en 2002, Marc Chaussidon s'est vu décerner, en 1995, la médaille Houtermans par l'European Association of Geochemistry.

Enquête au cœur de la matière... ou du système solaire ?

Par • **Marc Chaussidon,**

*Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
(CRPG, 15 rue Notre Dame des Pauvres, 54501, Vandoeuvre les Nancy,
site web : <http://crpg.cnrs-nancy.fr/>)*

• **Bernard Marty et Guy Libourel,**

Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG) & CRPG

• **Guillaume Caro et Béatrice Luais** (CRPG)

• **Cécile Fabre, Marie-Christine Boiron et Jean Dubessy,**

*Géologie et Gestion des Ressources minérales et énergétiques
(G2R, Faculté des Sciences), BP 70 239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy,
site web : <http://www.g2r.uhp-nancy.fr/>)*

En menant des investigations inédites sur quelques milligrammes de matières terrestres ou extraterrestres, les chercheurs nancéiens font en réalité progresser les connaissances sur les origines du système solaire et des planètes.

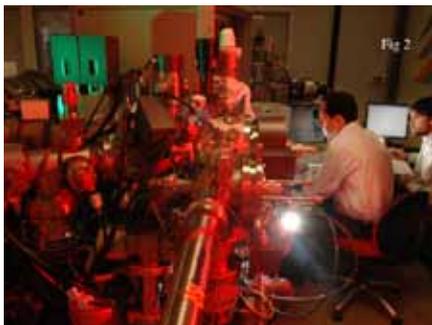


Fig 1

Les origines du système solaire

La particularité des travaux menés au sein de la Fédération de Recherche EST (voir encadré ci-dessous) tient au fait que Nancy est le seul endroit en France, et un des très rares endroits de par le monde, où des études de pétrologie expérimentale, de minéralogie et de géochimie isotopique sont menées en étroite association sur le matériel extraterrestre.

Les laboratoires de la Fédération de Recherche EST ont un potentiel unique sur le plan analytique encore renforcé par l'installation en novembre 2009 au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques du prototype d'une nouvelle sonde ionique. Cette nouvelle sonde devrait permettre d'atteindre des précisions inégalées dans la mesure des compositions isotopiques à l'échelle micrométrique (Fig 1).

Ce potentiel analytique et expérimental a très peu d'équivalents de par le monde : on peut citer par exemple l'université de Chicago, le Californian Institute of Technology (Caltech à Los Angeles) ou l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA).

La formation du système solaire, c'est-à-dire celle du Soleil et de tous les objets (planètes telluriques, planètes géantes gazeuses, astéroïdes, comètes) qui l'entourent, se produit à partir d'un mélange de gaz et de poussières (la nébuleuse solaire) qui s'organise sous forme d'un disque en rotation (le disque d'accrétion) autour du Soleil en formation. La trace de ce disque, à partir duquel le Soleil se construit par accrétion, est le plan de l'écliptique dans lequel toutes les planètes sont aujourd'hui en rotation autour du Soleil. Dans ce schéma général qui avait été proposé dès le XVIIIème siècle par Emmanuel Kant et Pierre Simon Laplace, beaucoup de questions se posent. Certaines de ces questions sont maintenant à notre portée grâce à l'avancée conjointe des observations astrophysiques des étoiles jeunes analogues au Soleil et à celle de l'analyse de plus en plus précise des roches extraterrestres (météorites, roches lunaires, fragments cométaires, vent solaire, poussière interplanétaire). Ce dernier domaine est celui dans lequel les laboratoires nancéiens jouent un rôle très important au niveau national et international (Fig 2).

Fig 1 : Photo de la sonde ionique Cameca ims 1270 du CRPG. Cet instrument, livré en 1996, est actuellement un des quatre instruments de ce type au monde (avec ceux de l'Université de Californie à Los Angeles, de l'Université du Wisconsin à Madison, et de l'Université d'Hokkaido à Sapporo) dédiés pour une grande partie de leur temps à l'analyse de la matière extraterrestre. Crédit : F. Demange

Fig 2 : Photo en lumière polarisée transmise d'une lame mince de la météorite Meso-Maderas. Cette météorite est représentative des météorites les plus primitives, c'est à dire des premières roches formées il y a 4,56 milliards d'années dans le disque d'accrétion autour du Soleil. Cette roche peut être considérée comme un sédiment formé avec tous les fragments solides qui étaient présents dans le disque. Parmi ces fragments un composant domine : les chondres qui sont ces billes de taille subcentimétrique contenant essentiellement des silicates cristallisés (olivine et/ou pyroxène) et du verre. La variabilité des textures visibles dans ces billes est comprise comme résultant de la variabilité de compositions des précurseurs et de la variabilité des conditions (température, temps, pression) dans lesquels ces précurseurs ont été fondus et trempés dans le gaz de la nébuleuse. Crédit : B. Zanda MNHN Paris

La fédération de recherche EST

Eau-Sols-Terre, trois lettres pour cette fédération de recherche qui regroupe les laboratoires nancéiens de sciences de la Terre rattachés au CNRS et à Nancy Université. (site web de la fédération EST : <http://eau.sol.terre.free.fr/>)

La Fédération a retenu six thèmes de recherche dont l'un consacré aux « origines ».

Le cadre de ces recherches est celui de la formation du système solaire il y a 4,6 milliards d'années, comme nous l'indiquent les âges les plus anciens calculés à partir des compositions isotopiques mesurées dans les météorites.

L'essentiel des travaux scientifiques réalisés autour de ce thème ces dernières années l'a été au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG), au laboratoire Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Énergétiques (G2R) au Laboratoire des Interactions Microorganismes-Minéraux-Matière organique (LIMOS) et au Laboratoire Environnement et Minéralurgie (LEM).

La problématique scientifique générale est d'étudier les premiers temps de la formation du système solaire et de l'évolution des planètes telluriques, que ce soit la Terre ou Mars.

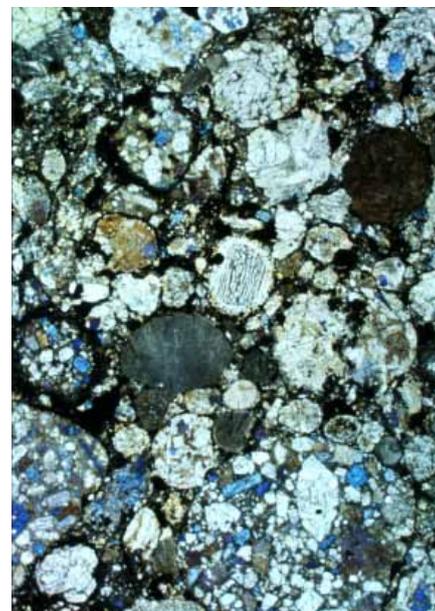


Fig 2

Rencontre avec Marc Chaussidon

Propos recueillis par
Valéry DUBOIS / Image Clé

Directeur de recherche au CNRS



Valéry DUBOIS, Image Clé

Valéry Dubois : Vous travaillez sur de très petites quantités de matières pour tirer des conclusions à très grandes échelles sur la formation du système solaire. Comment est-ce possible ?

Marc Chaussidon : Effectivement, alors qu'Apollo avait ramené de la Lune plus de 300 kilos de roches, les missions spatiales rapportent à présent des milligrammes de matière à peine. Quand ce n'est pas moins ! Il y a une mission (mission NASA Genesis), consacrée au vent solaire, qui a rapporté 10^{20} atomes, donc c'est vraiment très peu. Il s'agissait de particules de vent solaire piégées dans des collecteurs. Mais ça suffit pour partager ces échantillons entre plusieurs laboratoires dans le monde et chaque laboratoire est ensuite capable, avec sa technique propre, d'aller extraire ces quelques atomes et de les analyser.

On travaille parfois sur un milliardième de gramme. On ne le voit pas à l'oeil, on ne peut pas le manipuler, il y a beaucoup de contraintes. Ce qui fait la différence, c'est donc bien la manière dont on est capable de les étudier, de les analyser. Nous, nos spécificités c'est de pouvoir aller regarder à l'échelle du micromètre les variations de composition à l'intérieur de ces échantillons et de le faire avec une très grande précision. En fait, les archives, les informations qui sont stockées dans ces échantillons sont présentes à l'échelle du micromètre ou du nanomètre.

Cela peut paraître complètement artificiel pour quelqu'un qui vient de l'extérieur mais en mesurant les compositions isotopiques, les fines variations de compositions dans des grains qui font quelques microns, nous pouvons tirer des conclusions sur des événements qui se sont produits il y a plusieurs milliards d'années à très grande échelle : concernant la formation du soleil sur des échelles de centaines de millions de kilomètres. On passe d'une information stockée dans un grain micrométrique à quelque chose de très vaste parce que l'information a été préservée dans un minéral qui est solide et qui depuis 4,6 milliards d'années n'a pas évolué, a conservé cette information.

Les astrophysiciens qui observent la formation de nombreuses étoiles peuvent ensuite nous aider à comparer ce qui se passe autour d'autres étoiles dans l'univers avec ce que nous avons la possibilité d'étudier de notre côté pour le Soleil jeune.

VD : Le CRPG vient de se voir doté d'une seconde sonde ionique. Pour le laboratoire cela signifie quoi ?

MC : Cet instrument représente une avancée considérable avec une force analytique importante par rapport à d'autres laboratoires dans le monde. L'intérêt est de pouvoir repousser les limites de ce qu'on est capable de mesurer. Cela peut nous permettre par exemple de mesurer le temps beaucoup plus précisément, passer d'une précision d'un million d'années à une précision de 100 000 ans et de reconstituer ainsi l'enchaînement d'événements avec une bien meilleure précision. Pour arriver à gagner cette précision sur des échantillons qui font quelques microns, c'est très difficile.

Les échantillons des missions spatiales sont chers, d'autres échantillons terrestres sont très rares et contiennent des informations dans des micro-inclusions et qu'on ne peut donc pas analyser par d'autres moyens que par ces techniques.



VD : De nombreuses équipes travaillent à travers le monde sur la formation du système solaire. Quels sont les atouts qui distinguent les équipes nancéiennes ?

MC : Il y a au CRPG des laboratoires sans équivalent au monde. Globalement, tout le monde travaille à peu près sur les mêmes échantillons. Nos analyses par sonde ionique, sonde qui a été inventée en France à Orsay il y a une trentaine d'années et que nous avons utilisée pour l'appliquer à l'étude des météorites, est un point qui nous distingue. Nous avons aussi un certain nombre d'autres techniques de spectrométrie de masse qui utilisent un peu le même principe et nous travaillons avec une grande variété de compétences : des compétences analytiques, des compétences expérimentales, des compétences pour développer les instruments, des compétences en modélisation, en collaboration avec des collègues aussi bien astrophysiciens que géologues, chimistes, spécialistes des origines de la vie, physiciens.

Le CRPG est un laboratoire qui a été créé au départ comme une partie de l'école de géologie avec un but de compréhension de l'origine des gisements de matières premières et qui, avec le temps, a évolué vers un côté très instrumental. Nous avons progressé vers des thématiques importantes de la géologie comme l'origine de la terre et du système solaire, les climats passés de la terre, les variations des conditions de l'environnement, un grand nombre de travaux palpitants !

Les spécificités nancéiennes dans l'étude des échantillons extraterrestres

Fig 1 : Photo du système expérimental, appelé «nébulotron», développé pour simuler la formation des premiers solides par condensation dans le gaz de la nébuleuse autour du Soleil. Une cible de verre est pulvérisée par un faisceau laser, le plasma formé est maintenu à haute température dans un four et les condensats sont récupérés sur des plaques.
Crédit : CRPG

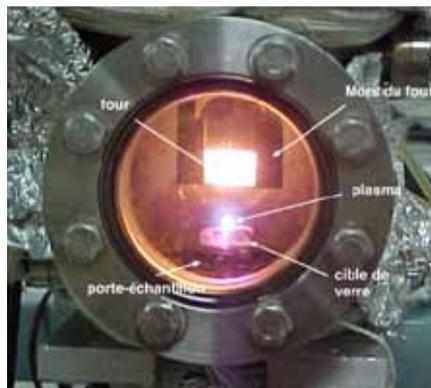


Fig 1

Une approche originale

Les travaux conduits sur les roches terrestres anciennes ou sur les échantillons extraterrestres, associent des approches de simulation expérimentale, de caractérisation analytique et de modélisation thermodynamique ou géochimique. De gros efforts ont été faits pour développer une approche expérimentale originale des processus de condensation à haute température dans le gaz de la nébuleuse et des processus d'interaction gaz-solide à haute température. L'équipement développé a été nommé «nébulotron» (Fig 1). L'association des différentes générations de «nébulotron» et des fours qui permettent de réaliser des expériences à haute température sous atmosphère contrôlée constitue un ensemble unique parmi les laboratoires de cosmochimie et permet de simuler à la fois des processus s'étant déroulés dans la nébuleuse protosolaire mais aussi des processus de condensation dans des enveloppes d'étoiles. Il faut mentionner que ces développements expérimentaux ont aussi des applications industrielles originales en sidérurgie ou par exemple pour simuler la condensation des métaux lourds polluants dans la cheminée d'un incinérateur d'ordures ménagères.

Des performances analytiques rares

Une autre particularité des laboratoires de la Fédération de Recherche Eau-Sols-Terre est d'avoir été moteurs au cours des dernières années dans des développements majeurs (spectroscopies in situ et rayonnement synchrotron, sondes ioniques, spectromètres de masse à source plasma ou à source laser, ...) autour des techniques de caractérisation minéralogique, spectroscopique, chimique et isotopique. Un développement majeur des dernières années a par exemple été celui d'une plate-forme analytique (Fig 2) couplant extraction sous bombardement laser et spectrométrie de masse statique, pour l'analyse des gaz (azote et gaz rares) dans les échantillons de vent solaire et de poussière cométaire ramenés par les missions spatiales NASA Genesis et Stardust. Pour donner une idée des performances analytiques qu'il faut pouvoir atteindre pour analyser de tels échantillons la quantité totale d'azote (^{14}N) et d'hélium (^3He) ramenée dans les collecteurs de vent solaire de la mission Genesis sont respectivement de 10^{12} et de 2×10^5 atomes (1 g de ^{14}N contient 4×10^{22} atomes de ^{14}N). Les blancs qui ont pu être atteints avec le système d'extraction laser sont de 10^{10} atomes pour ^{14}N et de 5000 atomes pour ^3He , ce qui a donc permis l'analyse du vent solaire piégé dans les cibles de Genesis.



Fig 2 : Plateforme analytique pour l'azote développée au CRPG pour l'analyse du vent solaire implanté dans les collecteurs de la mission Genesis. Les fragments des collecteurs sont bombardés avec un faisceau laser, les gaz extraits sont purifiés dans une ligne à ultraviolette et ensuite analysés pour leur composition isotopique dans un spectromètre de masse.
Crédit : CRPG

Fig 3 : Schéma de principe d'une sonde ionique (ims 1270 ou ims 1280 HR2). L'échantillon solide est bombardé par un faisceau d'ions primaires (en rouge) de haute énergie. Sous l'effet du bombardement une cascade de collisions affecte les 5 à 10 premières couches atomiques de l'échantillon dont les atomes constitutifs sont émis sous forme d'ions secondaires. Les ions secondaires (en jaune) sont ensuite triés en énergie par un secteur électrostatique et en masse par un secteur magnétique avant d'être comptés un par un dans la multicollection. Ces instrument est aussi un microscope ionique dont l'optique permet de réaliser à l'échelle du micromètre soit des cartographies de compositions isotopiques soit des mesures ponctuelles en haute précision des compositions isotopiques.
Crédit : C. Rollion-Bard CRPG

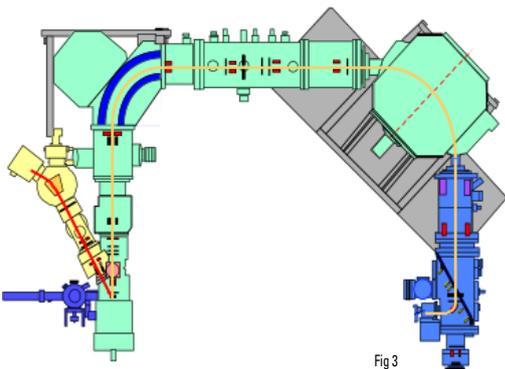


Fig 3

A propos de la nouvelle sonde ionique...

La grande opération actuelle est l'acquisition du prototype d'une nouvelle sonde ionique (Cameca ims 1280 HR2, Fig 3) qui correspondra à une nouvelle génération par rapport à la sonde actuelle. Ce prototype est installé depuis mi-novembre 2009 et une période de deux ans de développements est prévue avec le constructeur pour essayer d'atteindre les performances ultimes dans la mesure des compositions isotopiques avec des précisions de l'ordre de $\pm 10^{-5}$ sur le rapport isotopique.

Cet équipement permet à Nancy de conforter sa position de premier plan pour l'analyse de la matière extraterrestre.

Le caractère unique au plan national de ces instruments a été labellisé par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS en créant une plate forme technologique «analyse des échantillons extra-terrestres». Cette plateforme regroupe des financements de fonctionnement attribués par l'INSU aux instruments d'analyse nationaux qui sont hébergés dans quatre laboratoires (spectromètre de masse à source ICP à l'Institut de Physique du Globe de Paris et à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, la sonde ionique à grand rayon ims 1270 au CRPG de Nancy et la sonde ionique Nanosims au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris).

De nouvelles échelles de caractérisation. Et un départ pour Mars...

Tous ces développements autorisent maintenant :

- la caractérisation détaillée et complète de grains minéraux de taille allant de la dizaine de nanomètres au micromètre
- la mesure de compositions isotopiques avec des précisions améliorées d'un ou deux ordres de grandeur.

Atteindre cette échelle de caractérisation est une étape fondamentale qui a limité au cours des dix dernières années l'étude des échantillons extra-terrestres car les informations pertinentes sur leurs conditions de formation sont enregistrées à l'échelle du nanomètre ou du micromètre et correspondent souvent à des variations de composition isotopique de très faible ampleur.

Enfin, l'un des volets importants des développements analytiques conduits dans la fédération Est concerne le programme ChemCam que le G2R a intégré dès 2001 et qui prépare l'instrument principal d'analyse qui sera installé sur le rover de la mission MSL (Mars Science Lander) dont le lancement est prévu pour l'automne 2011.



Système solaire

Les grandes questions scientifiques des recherches nancéiennes

- l'origine des éléments chimiques et des matériaux qui ont constitué le système solaire
- la nature des processus physiques et chimiques à l'oeuvre dans le disque d'accrétion
- la chronologie de ces processus
- la nature des processus de formation et de différenciation planétaire
- l'évolution géologique précoce de la Terre et de Mars.

Ce dernier volet est par essence très large puisqu'il touche à la question de l'origine et du développement de la vie sur Terre. Cette question n'est pas abordée directement au sein des laboratoires de la Fédération de Recherche EST (il n'y a pas d'équipe d'exobiologie) mais plusieurs des travaux menés s'y rattachent. Cela concerne au premier plan la modélisation thermodynamique de la synthèse à partir de constituants inorganiques de composés d'intérêt prébiotique. C'est le cas aussi de la caractérisation minéralogique et géochimique de Mars associée aux processus profonds et aux processus superficiels liés à la présence d'eau liquide (altération, sédimentation), de la recherche de traces de vie fossiles dans des roches terrestres archéennes, de la recherche de traces spécifiques de l'altération des minéraux par des bactéries ou enfin, de la reconstruction des conditions paléo-environnementales anciennes de la Terre durant les deux premiers milliards d'années de son histoire, période clé pour son évolution géologique et biotique.

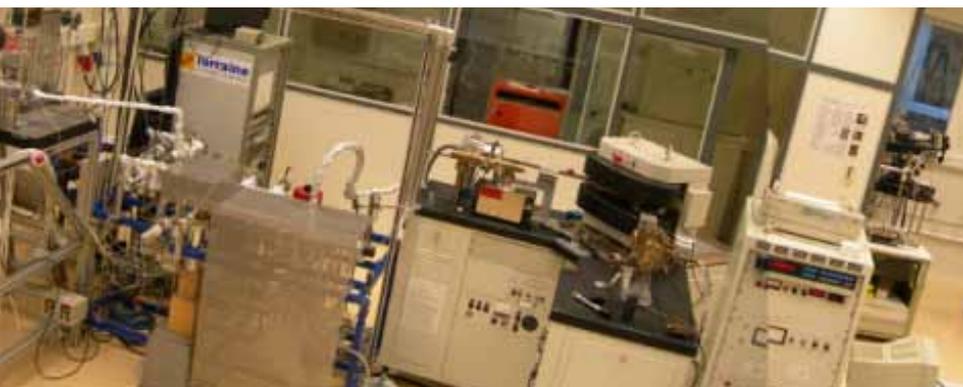
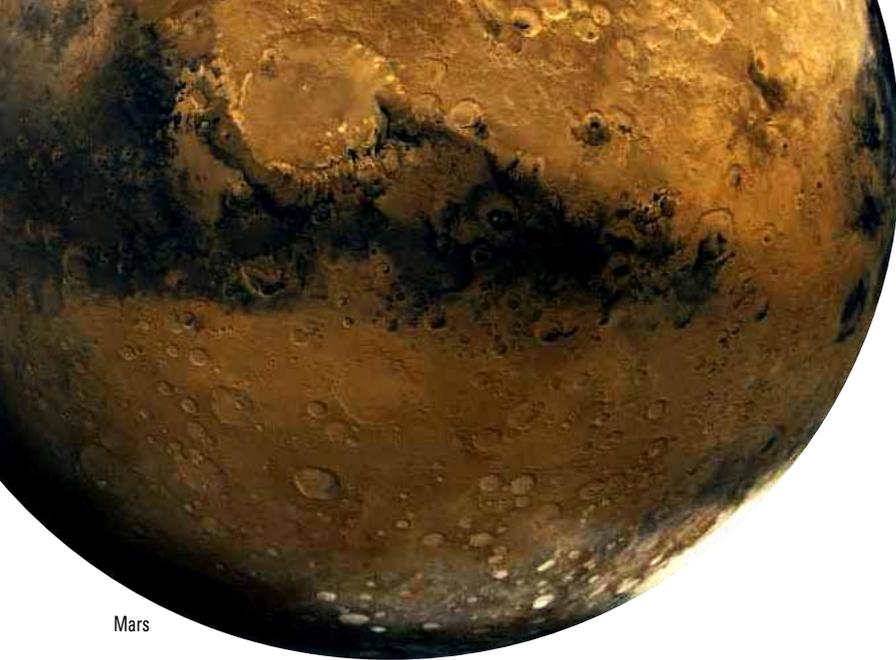


Fig 2



Mars

L'exploration géologique de Mars

Mars est la planète la mieux connue du système solaire après la Terre, et son exploration, commencée dans les années 1960 avec les sondes russes Mars, les sondes américaines Mariner et continuée par les sondes Viking en 1976, a connu un regain d'activités ces dix dernières années avec plusieurs missions spectaculaires et très productives scientifiquement (du robot Sojourner en 1996 à Mars Express actuellement).

Toutes ces missions donnent l'image d'une planète qui a suivi une évolution géologique très différente de celle de la Terre mais qui aurait pu durant les quelques premières centaines de millions d'années de son histoire avoir une évolution très semblable à celle de la Terre. Les traces de cette histoire primitive, effacées sur Terre, sont probablement toujours présentes à la surface de Mars et ce sera tout l'enjeu des missions futures que de les retrouver.

Une mission spatiale qui embarquera des instruments lorrains

La mission Mars Science Laboratory (MSL, Fig 1) qui sera lancée fin 2011 est la prochaine mission du programme d'exploration de la planète Mars de la NASA. Elle sera dotée d'un rover équipé de nombreux instruments destinés à :

- déterminer si la vie a pu exister sur Mars
- caractériser le climat martien
- caractériser la géologie martienne
- préparer l'exploration humaine éventuelle de Mars.

L'instrument ChemCam est un couplage entre une caméra permettant une observation optique de l'environnement du rover qui permettra aux opérateurs, situés sur Terre, de sélectionner la cible à analyser, et une analyse élémentaire de celle-ci (roches ou sols autour du rover) grâce à l'utilisation de la spectroscopie optique LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). L'expérience acquise au G2R dans cette technique analytique a permis d'aider à la conception de l'outil LIBS miniaturisé qui sera déposé sur la planète Mars. Le principe de cet instrument est d'utiliser un laser de puissance qui transforme un petit volume de la roche cible en un plasma (10 000°K). La composition de la cible est déterminée grâce à l'analyse spectrale des raies d'émission optique (UV-visible) des éléments contenus dans le plasma produit par la focalisation du laser sur la cible choisie. Cette technique permettra une analyse élémentaire des roches et des sols autour du rover martien jusqu'à environ 9 mètres.

Fig 1 : Vue d'artiste du rover de la mission MSL et du laser de l'instrument LIBS qui analyse à distance une falaise de roche à la surface de Mars. Crédit : JPL-NASA



Il faudra déterminer les cibles du laser de puissance

Le programme actuel porte sur la réalisation de différents analogues martiens simulant les compositions chimiques des roches ou sols susceptibles d'être présents sur la surface martienne. Ces cibles seront placées sur le rover afin d'obtenir des spectres de référence in situ. Le choix de leur composition et leur réalisation sont déterminants pour les futures interprétations scientifiques qui découleront des premières analyses LIBS obtenues. Elles devront être comparées à celles déduites des observations satellitaires. Les travaux en cours au G2R ont porté en particulier sur la synthèse de cibles standards qui serviront à calibrer le LIBS et donc sur l'obtention de compositions chimiques homogènes à l'échelle de la centaine de micromètres et sur les résistances mécaniques des cibles imposées par un rover de vol. Différentes compositions de verres silicatés synthétiques ont été sélectionnées (ainsi qu'un verre naturel). Les analyses réalisées à la microsonde électronique (UHP Nancy) et par femto-LA ICP MS (LMTG Toulouse) ont validé la composition de ces échantillons pour les éléments majeurs et les éléments traces comme standard. Les premiers tests réalisés en LIBS sur ces mêmes échantillons ont confirmé la possibilité de la détection des éléments majeurs (Na, K, Ca, Mg, Al, Si, Fe, Ti, Mn), des éléments en trace (Li, Cr, Ni, Co, Zr, Sc, Zn, Ba) mais aussi de l'Hydrogène, du Soufre. Les échantillons ont aussi passé avec succès les tests de résistance thermique et mécanique réalisés au Jet Propulsion Laboratory.

Le programme Raman de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a pour objectif de réaliser au contact de la roche une détermination in situ de la minéralogie grâce à un spectromètre Raman. Les objectifs scientifiques prévus pour cette mission sont plus tournés vers l'identification d'une chimie prébiotique ou de restes de molécules liées à des formes de vie primitive, grâce à l'analyse par spectroscopie Raman des phases minérales (en particulier celles associées aux processus d'altération et d'évaporation comme les sulfates, les carbonates, les argiles) et des molécules organiques.

La modélisation numérique des processus d'altération des roches martiennes

Les données récentes concernant la surface de la planète Mars obtenues à l'aide des rovers (Spirit et Opportunity) et de la mission OMEGA ont montré que l'eau a résidé pendant des temps suffisants pour générer des réactions d'altération des roches et produire des précipitations chimiques sous forme d'argiles et de sulfates.

Les conditions physico-chimiques régnant lors de l'altération des roches volcaniques (shergottite basaltique, lherzolitique, andésites) et des roches grenues mafiques (naklites et chassignites) et lors de l'évaporation des solutions d'altération au Noachien et Hespérien (les périodes les plus anciennes de l'histoire de Mars, le Noachien correspondant à tout ce qui est plus vieux que $\approx 3,7$ milliards d'années) sont encore mal connues. La cinétique avec laquelle les minéraux sont altérés joue un rôle essentiel dans l'évolution de la chimie de la solution altérante. Or l'altération chimique s'est réalisée dans des conditions où l'atmosphère, de chimie mal connue et variable au cours du temps (H_2O , CO_2 , SO_2), et les solutions aqueuses étaient soumises au rayonnement UV-C provenant du soleil produisant des radicaux très réactifs. Ces paramètres n'ont pas été expérimentés, ni quantifiés. L'objectif de ce programme de recherche est de prédire les processus d'altération et d'évaporation en conditions martiennes en combinant une approche expérimentale et de modélisation numérique.

On considère la variation des compositions chimico-minéralogiques des roches, des paramètres relatifs à l'atmosphère martienne et des températures. L'altération est simulée expérimentalement sur des verres de synthèse représentatifs des roches martiennes en présence ou absence de rayonnement UV-C. En se basant sur les résultats expérimentaux, des simulations numériques de l'altération chimique des roches martiennes et de l'évaporation sont réalisées afin d'évaluer l'effet des variations des paramètres physico-chimiques sur la nature et

l'abondance des produits formés (argiles, carbonates, sulfates). Sous atmosphère neutre d'azote à 99,95 %, les solutions expérimentales montrent un taux de dissolution constant au cours du temps, bien suivi par les éléments traces inclus dans le verre (Li, B et Cs). La concentration en Al, Fe et Mg croît avec le temps jusqu'à la fin des expériences (3 mois). En revanche, la concentration en Si et Ca décroît significativement dès le quatrième jour, ce qui indique un état de saturation de la solution vis-à-vis de certains minéraux. La présence de calcite est observable dès la deuxième semaine pour l'expérience en présence de rayons ultraviolets. Ce même minéral est également observé dans les échantillons non soumis aux radiations mais beaucoup plus tard (environ 1 mois). Les résultats obtenus sont confrontés aux observations orbitales et mesures in situ afin d'améliorer les connaissances sur les conditions de formation et d'évolution des roches de la surface martienne. Les résultats issus des modélisations numériques et expérimentales contribuent à comprendre et quantifier les processus météoriques et sédimentologiques au Noachien et à l'Hespérien. La prédiction des différentes phases minérales d'altération et d'évaporation s'appuyant sur les modélisations expérimentales et numériques fournit des contraintes et des guides pour interpréter en termes de géochimie les identifications de minéraux obtenues par les méthodes orbitales ou in situ. Ces données serviront aussi à calibrer et interpréter les données spectrales, en particulier obtenues par les spectroscopies Raman et LIBS qui font l'objet de recherches dans l'unité G2R dans le cadre du programme Chemcam franco-américain de MSL de la NASA et EXOMARS de l'ESA. Enfin, elles permettront aussi d'estimer, en fonction de la chimie de l'atmosphère, les compositions chimiques des solutions aqueuses dans lesquelles auraient pu se développer une chimie pré-biotique.

Des collaborations nationales et internationales et des soutiens nombreux

Des collaborations étroites existent au niveau national avec plusieurs des laboratoires qui sont des acteurs majeurs pour l'étude de la matière extra-terrestre en France (MNHM de Paris, IPG de Paris, ENS de Lyon, CSNSM d'Orsay, Observatoire Midi Pyrénées à Toulouse, ...).

Il n'y a pas à Nancy de compétence forte en planétologie et c'est la raison pour laquelle des liens ont été développés avec le laboratoire de planétologie de Nantes (à travers le master commun Nantes-Nancy) et l'OMP à Toulouse (avec par exemple le projet ChemCam).

Tous ces travaux sont menés et reconnus dans le cadre de programmes nationaux et internationaux, plusieurs nancéiens participant aux instances de ces programmes (ou même les président).

● **Au plan régional**, la Région Lorraine a soutenu très significativement pendant 3 ans un projet jeune équipe sur l'étude de la matière extraterrestre et a accompagné les équipements spécifiques co-financés par le CNES et l'INSU-CNRS. Le soutien de la région Lorraine a été déterminant dans l'acquisition en 1996 de la sonde ionique à grand rayons 1270 et cette année pour l'acquisition de la sonde ionique 1280 HR2.

● **Au plan national**, c'est en premier lieu le programme national de planétologie (PNP), l'ANR non thématique (ANR ECSS 2005-2008, ANR T-TauriChem 2009-2013), les programmes d'exploration du système solaire du CNES qui ont soutenu très fortement l'étude à Nancy des échantillons des missions de collecte du vent solaire (Genesis) et de grains cométaires (Stardust) et le développement de l'outil LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) pour l'instrument ChemCam (qui sera sur le rover martien de la mission MSL).

● **Au plan international**, plusieurs chercheurs nancéiens ont été sélectionnés par la NASA comme Principal Investigator (PI) pour l'étude des échantillons lunaires des missions Apollo, l'étude des échantillons des missions Genesis et Stardust et bien sûr pour la mission ChemCam. Les chercheurs nancéiens avaient été très actifs lors de l'appel d'offres autour de la mission MARS PREMIER pour l'étude des échantillons martiens et il y a toujours la volonté de s'investir dans la préparation à un futur retour d'échantillons martiens. D'autres actions ont démarré au niveau national et international pour être PI dans de futures missions internationales. Le CRPG a par exemple été sollicité par le CNES pour organiser l'analyse d'échantillons ramenés de Phobos (un des deux satellites de Mars) par la mission russo-française Phobos Grunt. A plus long terme, les chercheurs du CRPG font partie de l'équipe scientifique de la future mission entre l'Europe (ESA) et le Japon (JAXA) pour le retour sur Terre d'un échantillon d'un astéroïde géocroiseur. Cette mission nommée Marco-Polo est actuellement à l'étude et devrait être lancée en 2017 pour une arrivée sur l'astéroïde du satellite en 2020 et un retour sur Terre des échantillons en 2023. Le soutien de l'Europe s'est fait à travers la participation du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) pour l'acquisition de la sonde 1280 HR2 et l'attribution à l'un de nous pour les 5 prochaines années d'une bourse senior ERC (European Research Council).

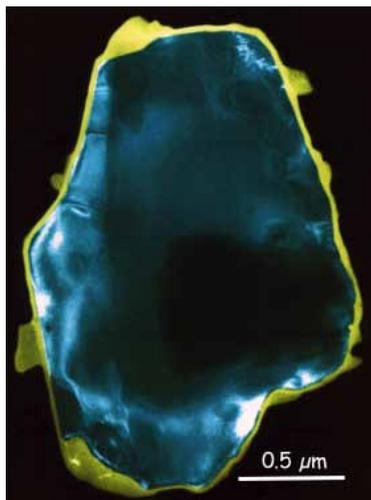


Fig 1

Quelques résultats scientifiques emblématiques



Sonde Genesis de la NASA

Réservoirs cosmochimiques : du milieu interstellaire au soleil jeune

Une des questions essentielles sur l'origine du système solaire est de connaître la nature (gaz, grains cristallisés ou amorphes, composés organiques) et les compositions chimiques et isotopiques des matériaux à partir desquels le système solaire s'est formé. Répondre à cette question implique de se poser la question de l'origine de ces constituants (et donc de leur histoire présolaire que ce soit dans des environnements stellaires ou interstellaires) et d'essayer de déterminer leur composition à partir de l'étude de certains échantillons extra-terrestres bien choisis. Ces questions ont été abordées sous trois angles différents :

- l'analyse de la composition isotopique du vent solaire
- l'étude du matériel cométaire
- l'étude de la matière carbonée des météorites primitives.

les techniques spectrométriques ne sont pas assez précises. Jusqu'à très récemment les seuls échantillons disponibles étaient les sols lunaires ramenés par les missions Apollo et Luna des années 1970. Du fait de l'absence de champ magnétique et d'atmosphère sur la Lune, le vent solaire s'implante sur les quelques dizaines à centaines de nanomètres d'épaisseur des grains des sols lunaires (Fig 1). Grâce à l'utilisation de la sonde ionique nous avons pu développer des techniques d'analyse par profil en profondeur grâce auxquelles il est possible d'extraire sélectivement les atomes contenus dans la couche de surface des grains où le vent solaire est implanté et de mesurer sa composition isotopique (Fig 2). Ces travaux nous ont amenés à nous intéresser de plus en plus au vent solaire et à être sélectionnés pour l'analyse de la composition isotopique de l'azote contenu dans les collecteurs de vent solaire de la mission NASA Genesis (Fig 3). Malgré l'écrasement de la capsule Genesis à son retour sur Terre (Fig 4) et la pollution terrestre qui en a résulté,

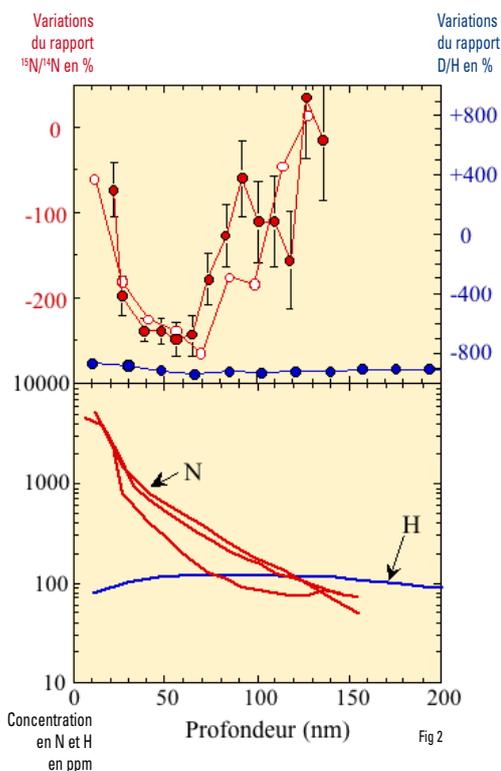


Fig 2

La connaissance de la composition isotopique du Soleil revêt une importance considérable en cosmochimie, notamment en ce qui concerne la compréhension de l'origine des volatils (H, C, N, O et gaz rares) dans le système solaire, de leur distribution et évolution à l'intérieur du système solaire, et enfin des processus d'acquisition et de formation des atmosphères et des hydrosphères des planètes. Les couches externes du Soleil, qui sont la source du rayonnement solaire (le vent solaire), sont isolées des zones internes où les réactions thermonucléaires se produisent et ont donc a priori préservé la composition originelle du gaz de la nébuleuse solaire. Cependant la grande difficulté consiste à être capable d'effectuer des mesures précises de la composition isotopique du vent solaire et pour cela il faut impérativement avoir des échantillons de vent solaire dans le laboratoire car



Fig 4

la composition isotopique de l'azote du vent solaire a pu être mesurée en utilisant les photons d'un laser UV ($\lambda = 196 \text{ nm}$) pour «peler» en profondeur croissante et sous ultraviolette les cibles endommagées. Les résultats sont surprenants et soulèvent un problème de planétologie très important. Toutes les mesures disponibles (sols lunaires, collecteurs de Genesis et

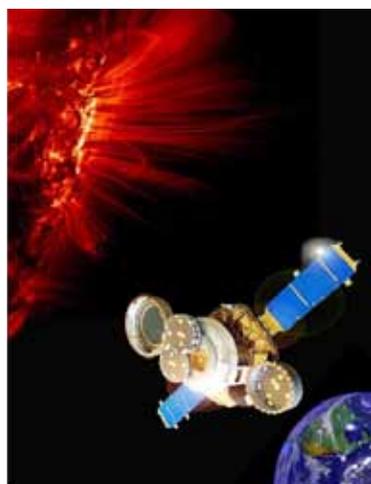
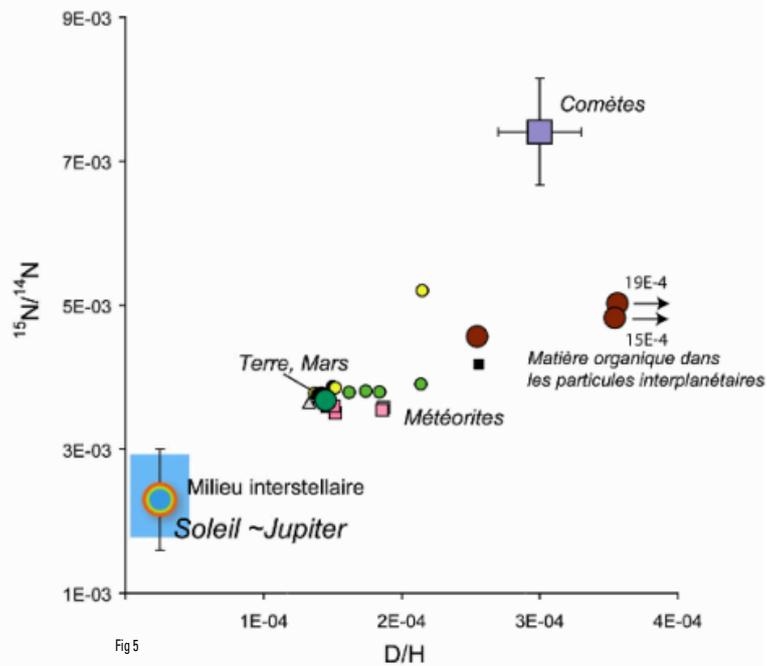


Fig 3



atmosphère de Jupiter) vont dans le même sens : le Soleil a une composition isotopique en azote très différente (appauvrie d'environ 40% en ¹⁵N, le deuxième isotope stable de l'azote) de celle de la Terre, de Mars ou des météorites. La Terre serait donc une anomalie pour sa composition isotopique de l'azote dans le système solaire (puisque l'essentiel de la matière du système solaire est dans le Soleil). Nos travaux les plus récents montrent que ceci semble en fait être le cas pour tous les principaux éléments légers volatils H, C, N et O (Fig 5). L'origine de cette différence fondamentale entre les planètes telluriques et le Soleil devient aujourd'hui une question essentielle. Une des possibilités qui est en train d'être testée est que le Soleil lors de sa formation aurait pu irradier le gaz de la nébuleuse environnante et y provoquer un certain nombre de réactions nucléaires et photochimiques qui auraient fait évoluer la composition du gaz à partir duquel les planètes commençaient à se former quelques millions d'années plus tard.

À l'inverse du vent solaire, qui donne peut-être une image de la composition du gaz de la nébuleuse dans les zones internes, les comètes sont théoriquement des témoins des zones externes du système solaire, peut-être moins bien mélangées physiquement, et dans lesquelles aucun processus de haute température n'a pu se produire. Le 15 janvier 2006, la capsule de la mission NASA Stardust (Fig 7) ramenait sur Terre environ 10 000 grains de taille comprise entre ~1 et ~300 µm collectés dans la queue de la comète 81P/Wild 2. Le CRPG faisant partie du « Preliminary Examination Team (PET) » a reçu durant le premier semestre 2007, plusieurs fragments d'aérogel contenant des traces bulleuses faites de fragments de grains et de

leurs produits de réaction avec l'aérogel (Fig 7) ainsi qu'une particule terminale (un fragment de grain) de ~25 µm de diamètre. Les observations et les analyses faites lors du PET au CRPG (concentrations en He, Ne et Ar, compositions isotopiques du Ne et de l'O) ont montré deux choses importantes :

- une partie des volatils des grains cométaires se sont dégazés lors de l'impact et ont été piégés sous forme de bulles dans l'aérogel
- des grains formés à haute température (silicates réfractaires, olivine, pyroxène) étaient présents dans le noyau de la comète Wild 2.

Ces deux observations impliquent qu'en fait parmi les matériaux de base qui ont servi à former les comètes se trouvaient des grains qui ont été condensés à haute température à proximité du Soleil, de l'ordre de 0,06 unité astronomique (1 unité astronomique étant la distance entre la Terre et le Soleil), et que durant leur séjour proche du Soleil ces grains ont accumulé des éléments volatils implantés sous irradiation par le Soleil jeune. Ces grains ont ensuite été transportés à plus de 50 unités astronomiques, dans la région de formation des comètes, ce qui implique l'existence de processus de transport à très grande échelle dans le disque d'accrétion solaire.

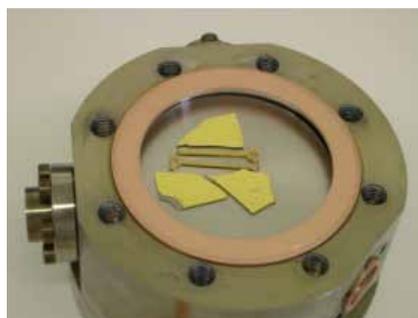


Fig 6

Fig 1 : Photo en fausses couleurs par microscopie électronique à transmission d'un grain de silicate provenant d'un sol lunaire échantillonné par la mission Apollo 11. La couche jaune de ~50 nanomètres d'épaisseur est en fait amorphe. Elle a été amorphisée à la suite de l'implantation du vent solaire pendant plusieurs centaines de millions d'années à la surface de la Lune. C'est cette couche qui contient les ions du vent solaire et qui peut être analysée sélectivement par profil en profondeur avec une sonde ionique. Crédit : Y. Langevin IAS

Fig 2 : Profil de la composition isotopique de l'azote (le rapport ¹⁵N/¹⁴N) et de l'hydrogène (rapport D/H) et des concentrations en N et H mesuré par sonde ionique dans un grain du sol lunaire de la surface du grain vers la profondeur. Vers 50 nanomètres de profondeur est présent de l'azote qui a une composition isotopique appauvrie en ¹⁵N de ~250% par rapport à la surface. Cette composition est celle du vent solaire implanté à cette profondeur. Ce grain contient d'ailleurs de l'H solaire que l'on identifie du fait qu'il ne contient pas de deutérium (rapport D/H plus bas de ~900% par rapport à la valeur terrestre de référence), le deutérium ayant été brûlé par des réactions nucléaires dans le Soleil lors de sa formation. Crédit : CRPG

Fig 3 : Vue d'artiste du satellite NASA Genesis entre le Soleil et la Terre avec ses collecteurs de vent solaire ouverts. Crédit : NASA-JPL

Fig 4 : Retour mouvementé le 8 septembre 2004 dans le désert de l'Utah pour la capsule de la mission Genesis dont les parachutes de rentrée ne se sont pas ouverts. Malgré tout, certains des collecteurs sont presque intacts et tous leurs fragments ont pu être récupérés et partiellement nettoyés car le vent solaire est implanté à quelques dizaines de nanomètres sous la surface. Crédit : NASA-JPL

Fig 5 : Diagramme montrant les variations des compositions isotopiques de l'azote (rapport ¹⁵N/¹⁴N) et de l'hydrogène (rapport D/H) du Soleil (déterminé grâce à l'analyse des collecteurs de la mission Genesis) et des autres corps connus du système solaire. Les variations isotopiques de l'azote dans les corps du système solaire, combinées à celles du rapport deutérium/hydrogène (D/H), montrent que tous les objets autres que les planètes géantes sont anormaux. En effet, les planètes terrestres, les météorites et les comètes présentent des enrichissements marqués en isotopes lourds ¹⁵N et D par rapport à la nébuleuse originelle (caractérisée le Soleil et par le gaz du milieu interstellaire de la galaxie). Ces enrichissements sont sans doute les témoins des processus ayant conduit à la formation du système solaire, qu'il faut maintenant décrypter. Crédit : B. Marty CRPG

Fig 6 : Fragments des collecteurs de Genesis dans la chambre d'analyse au CRPG (la taille des fragments est subcentimétrique) Crédit : CRPG

Fig 7 : Vue d'artiste du satellite de la mission NASA Stardust se rapprochant de la comète Wild 2 et échantillonnant les grains de poussières qui s'échappent de la comète. Crédit : JPL-NASA

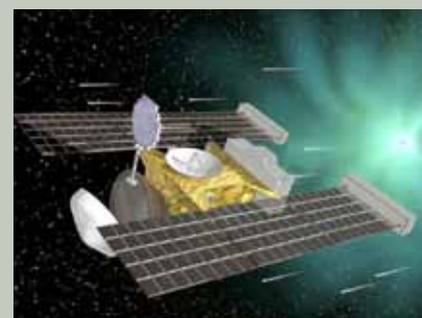


Fig 7

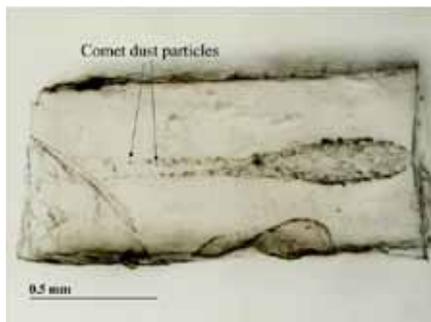


Fig 1

Processus nébulaires

Comment, quand et à quelle vitesse se sont formés les premiers solides dans le gaz de la nébuleuse ? Qu'elle a été l'évolution qui a conduit aux premières petites planètes ? Pour essayer de répondre à ces questions l'approche consiste :

- à étudier les composants formés à haute température, les inclusions réfractaires riches en Ca et en Al (appelées CAIs) et les chondres des météorites primitives (les chondrites)
- à simuler expérimentalement les processus à haute température de condensation à partir du gaz et les processus d'échanges gaz-solides.

Une chronologie relative des processus de condensation et de formation des CAIs et des chondres peut être établie à partir des traces laissées par la désintégration in situ des isotopes radioactifs à courte période (radioactivités éteintes telles que ^{10}Be , ^{26}Al , ^{60}Fe) qui étaient présents dans le disque d'accrétion. Ces traces sont en excès dans les isotopes fils, par exemple le ^{26}Mg qui provient de la désintégration β de ^{26}Al qui a une demi-vie de 0,73 millions d'années. Nos travaux récents ont démontré l'isotope ^{26}Al était bien distribué d'une manière homogène dans le disque d'accrétion il y a 4,568 milliards d'années au moment de la formation des CAIs. Les variations d'abondance de ^{26}Al observées dans les chondres (Fig 2) impliquent que leur formation s'est étalée entre $\approx 0,8$ et ≈ 3 millions d'années après les CAIs. Cette période de quelques millions d'années est la période clef de l'histoire du disque. Les traces que nous avons trouvées dans les CAIs d'une autre radioactivité éteinte à très courte période, le ^7Be qui a une demi-vie de 53 jours, impliquent que ces CAIs se sont formés très près du Soleil et très tôt. En effet, le ^7Be ne peut être produit que lors de l'irradiation de grains par le rayonnement énergétique de protons et de particules α émis par le Soleil jeune. Ces résultats sont importants parce qu'ils font le lien entre les observations astrophysiques des étoiles en formation et certains fragments des météorites et qu'ainsi ils permettent de rattacher temporellement et spatialement la formation des premiers solides dans le système solaire à l'évolution précoce du Soleil et aux processus d'irradiation associés.

La compréhension de la formation de ces premiers solides à haute température dans le gaz de la nébuleuse est uniquement fondée sur une approche théorique à partir de calculs thermodynamiques. Un nouveau système expérimental a donc été développé (le «nébulotron» de 3ème génération)

pour essayer de reproduire en laboratoire ces processus de condensation à haute température. Ce système comporte un bombardement laser d'une cible de composition déterminée ainsi qu'un four qui homogénéise en phase vapeur les produits résultants du bombardement laser avant de les condenser sur des plaques métalliques. La température (de 1045 à 1285°C) et la pression ($\approx 4 \times 10^{-3}$ bar) sont contrôlées durant l'expérience. Ce dispositif expérimental est unique et a permis pour la première fois de reproduire une partie de la séquence de condensation observée dans les météorites primitives et de mettre en évidence les effets cinétiques par rapport aux prédictions thermodynamiques dans le cas d'une condensation à l'équilibre (Fig 3). A partir d'un gaz riche en Mg et Si (et ayant des rapports de concentration solaire pour Ca, Al, Mg et Si) la formation d'oxydes et de silicates cristallins (corindon, spinelle, anorthite, méililite, diopside alumineux, forstérite et enstatite) a été obtenue (Fig 4). Ces résultats expérimentaux démontrent que les inclusions réfractaires des météorites primitives, ou en tous cas leurs précurseurs, ont bien pu se former par condensation dans le gaz chaud de la nébuleuse protosolaire. De nombreux autres développements de cette expérience sont envisageables pour étudier les processus de condensation que ce soit dans le système solaire ou les enveloppes stellaires. Les résultats les plus récents dans ce domaine concernent la démonstration de la possibilité de former des carbonates (minéraux normalement considérés comme précipitant à partir d'une solution aqueuse) par condensation dans des enveloppes d'étoiles.

Enfin, l'association des observations minéralogiques des chondres réduits (chondres de type I considérés comme les chondres les plus primitifs) et des expériences de fusion sous atmosphère enrichie en éléments volatils tels que Na ou Si, ont permis de proposer une origine pour

ces chondres totalement différente des idées classiquement admises. Les chondres de type I seraient le résultat de l'interaction de fragments lithiques (olivine réfractaire + métal ± spinelle) avec le gaz et les poussières de la nébuleuse. Durant cette interaction, les olivines subissent une fusion partielle et le liquide produit s'enrichit en Si et en alcalins à partir du gaz. A son stade ultime ce processus peut conduire à une résorption presque totale des olivines réfractaires et à la formation de chondres riches en pyroxène et en olivines secondaires. La formation des chondres doit donc être considérée comme un processus se produisant en système ouvert exigeant un temps suffisant pour résorber les olivines réfractaires. La texture des assemblages olivines réfractaires - métal (Fig 5) indique un équilibre long à haute température, incompatible avec les durées caractéristiques des processus nébulaires. Ces olivines pourraient être des fragments de manteau de petites planètes qui se seraient formées et différenciées très tôt dans l'histoire du système solaire, durant les premiers millions d'années avant même que les corps parents des chondrites ne se forment. Ces planètes ont du disparaître, être fragmentées, évaporées ou accrétées au Soleil au bout de 1 ou 2 millions d'années. Les météorites nous donneraient donc accès à des planètes disparues du système solaire.

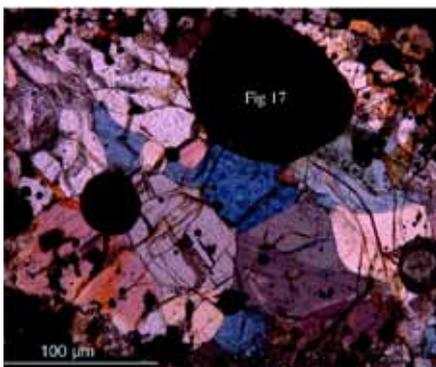


Fig 5

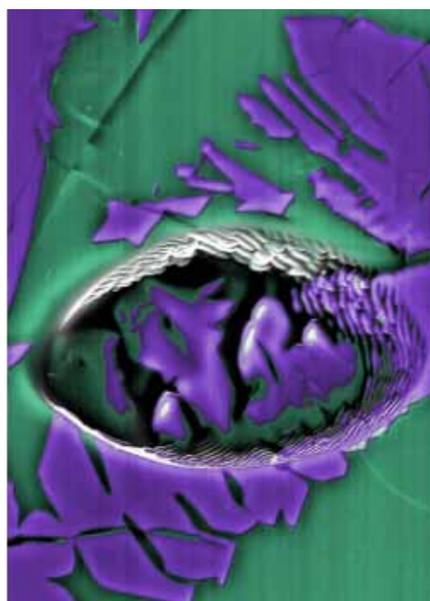


Fig 2

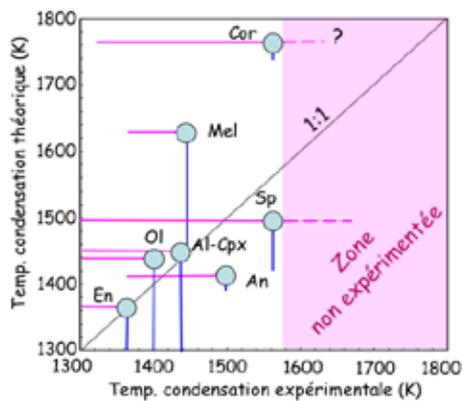


Fig 3

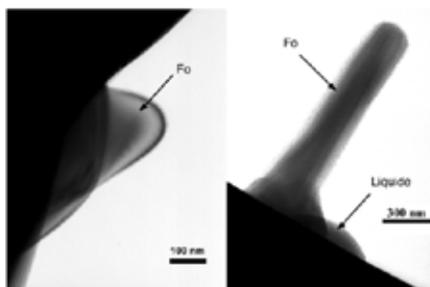


Fig 4

Fig 1 : Photo d'une tranche dans l'aérogel de grains cométaires échantillonnés par la mission Stardust. L'aérogel est la mousse de silice qui couvrait les collecteurs de Stardust et qui était destinée à ralentir sans les fragmenter et capturer les grains qui arrivaient avec une vitesse relative par rapport au satellite de 6,2 km/sec. Sur la photo les grains sont entrés par la droite, ont explosé en formant une cavité, certains fragments allant jusqu'à 1 mm de profondeur. Ce sont ces grains déposés tout au long de la trajectoire dans l'aérogel qui ont été analysés. Crédit : P. Tsou JPL-NASA

Fig 2 : Cratère d'analyse (≈ 25 µm de diamètre) creusé par la sonde ionique ims 1270 dans un chondre de la météorite Semarkona pour analyser la quantité de ²⁶Al présente lors de la formation de ce chondre il y a ≈ 4,566 milliards d'années. Les fausses couleurs montrent des différences de composition chimique. Le verre (couleur verte) est le plus vieux verre naturel connu. Crédit : J. Villeneuve CRPG

Fig 3 : Diagramme montrant une comparaison entre les températures de condensation de minéraux réfractaires dans la nébuleuse solaire soit calculées (en ordonnées) en supposant l'équilibre thermodynamique pour une pression totale de 10⁻³ atmosphère et un gaz de composition solaire soit déterminées expérimentalement (en abscisses) à partir des expériences faites dans le nébulo-tron. Les différents minéraux observés dans les expériences sont le spinelle (Sp), le corindon (Cor), l'anorthite (An), la méililite (Mel), le clinopyroxène (Al-Cpx), l'olivine (OI) et le pyroxène enstatite (En). A l'évidence l'accord entre les expériences et les prédictions thermodynamiques à l'équilibre n'est pas parfait, ce qui est très intéressant car cela montre l'importance des effets cinétiques dans ces processus de condensation. Crédit : G. Libourel CRPG

Fig 4 : Photos en microscopie électronique à transmission des produits de la condensation, ici de l'olivine et du verre, dans une des expériences faites avec le nébulo-tron. Crédit : A. Toppani CRPG.

Fig 5 : Photos en lumière transmise polarisée d'une lame mince d'un chondre porphyrique riche en olivine. La texture observée, joints secs (sans liquide piégé) entre les cristaux d'olivine et angles entre les cristaux de 120°C est typique d'une texture produite lors d'un recuit à haute température pendant un temps long et sous pression. De telles textures sont connues pour les roches du manteau terrestre. Ces agrégats d'olivine découverts dans les chondres pourraient donc être des fragments de manteau de petites planètes formées très tôt dans l'histoire du système solaire et fragmentées rapidement avant la formation des chondres (dans les 2 à 3 premiers millions d'années du système solaire). Crédit : G. Libourel (CRPG)

Evolution planétaire précoce



Fin 2

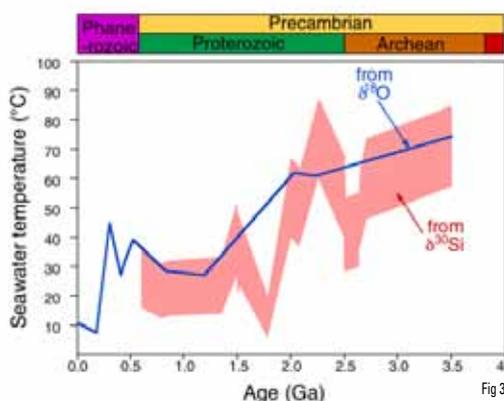


Fig 3

Fig 1 : Vue d'artiste de la Terre il y a 3,8 milliards d'années. Les premiers continents commencent à se former, la Lune est plus près de la Terre qu'aujourd'hui, l'atmosphère a une composition et une couleur très différentes d'aujourd'hui (elle ne contient pas d'oxygène), les impacts de météorites sont plus fréquents qu'aujourd'hui. C'est dans ces conditions que la vie aurait démarré sur Terre.
Crédit : MNHN-CRPG

Fig 2 : Photo d'un silex stromatolithique archéen (âge 3,2 milliards d'années). Cette roche est comprise comme étant au départ un récif carbonaté fabriqué par des colonies d'algues bleues. Ces carbonates ont ensuite été silicifiés pour être transformés en silex. Ces silex sont les roches sédimentaires anciennes terrestres les mieux préservées. Leurs compositions isotopiques (O, Si) peuvent permettre de remonter par exemple à la température de l'eau de mer dans laquelle ils se sont formés.
Crédit : F. Robert MNHN

Fig 3 : Variations de température des océans reconstituées à partir des variations de composition isotopique de l'oxygène (notée $\delta^{18}O$) et du silicium (notée $\delta^{30}Si$) mesurées dans les silex Précambriens. La manière la plus simple de comprendre ces variations de composition isotopique est que la température des océans ait changé d'environ 50°C au cours du Précambrien.
Crédit: M. Chaussidon CRPG

L'évolution planétaire précoce est un thème commun à beaucoup de travaux réalisés dans la fédération EST et qui associe l'étude des météorites à celle des échantillons terrestres anciens. Ce thème regroupe des études sur la différenciation des planétésimaux et de la Terre, l'histoire géologique de la Terre à l'Hadéen (entre 4,5 et 3,8 milliards d'années) et au Précambrien (entre 3,5 et 0,6 milliards d'années), la reconstruction des paléoclimats au Précambrien, l'origine de la matière carbonée et des composés organiques d'intérêt prébiotique à l'Archéen (entre 3,8 et 2,5 milliards d'années). L'Hadéen est étymologiquement la période des « enfers » durant laquelle la Terre passe par un stade d'océan magmatique où la température de surface est supérieure à 1200°C, c'est à dire est recouverte sur toute sa surface d'une couche de plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur de silicates fondus. Aucune roche à proprement parler ne subsiste de cette époque, mais des traces sont visibles dans la composition chimique et isotopique du manteau. La fin de l'Hadéen est marquée par le grand bombardement tardif pendant lequel la Terre et la Lune sont bombardées par un flux intense de petits corps (astéroïdes, noyaux cométaires). Si la tectonique des plaques a effacé toutes traces de ce grand bombardement tardif sur Terre, ce n'est pas le cas de la Lune où la cratérisation de la surface est toujours visible. Il est probable, même si cela est très discuté, qu'aucune forme de vie n'ait pu survivre au grand bombardement tardif. A partir de 3,8 milliards d'années (Fig 1) les continents tels qu'on les connaît aujourd'hui commencent à se former et l'histoire géologique, à laquelle on peut avoir accès par des échantillons de roches, commence.

A partir du moment où de l'eau liquide stable a été présente à la surface de la Terre, et certains arguments isotopiques plaident en faveur de la présence d'eau liquide dès 4,3 milliards d'années, des systèmes hydrothermaux analogues aux systèmes sous marins observés aujourd'hui aux rides médio-océaniques ont dû s'établir. Ces environnements sont des endroits possibles pour l'origine de la vie. Les progrès considérables, réalisés en géochimie théorique dans l'obtention de données thermodynamiques pour des composés organiques d'intérêt prébiotique ainsi que pour les biomolécules, permettent de définir les domaines de stabilité de ces composés organiques en fonction de la température, de la pression, du pH des fluides



Fig 1

hydrothermaux et des conditions d'oxydoréduction. Les calculs thermodynamiques peuvent servir de guide pour des études expérimentales dont le but est d'évaluer les possibilités de synthèse à partir des constituants inorganiques des fluides hydrothermaux (CO_2 , N_2 , H_2) de composés d'intérêt prébiotique tels que l'acide cyanhydrique (HCN) ou le formaldéhyde (HCHO). Ces composés sont les précurseurs respectifs des bases azotées (adénine, guanine, cytosine, uracile, thymidine) et des sucres (ribose), eux-mêmes constituants des acides nucléiques. Leur étude peut apporter des informations sur les conditions dans lesquelles les premières molécules organiques ont pu être formées et stabilisées sur la Terre primitive, ainsi que sur le rôle joué par les phases minérales (saponites, serpentines, brucite ...) dans l'élaboration des premières biomolécules.

La Terre a connu dans son histoire archéenne des changements climatiques de grande ampleur et un des grands paradoxes de son histoire climatique est celui du « Soleil faible ». Du fait du déroulement des réactions de fusion d'hydrogène dans le cœur du Soleil, sa luminosité a augmenté de 25 à 30% depuis 4,5 milliards d'années de sorte que, avec une composition atmosphérique similaire à l'actuel, la Terre aurait dû être totalement gelée durant l'archéen.



La présence de sédiments marins déposés à cette époque montre que tel n'était pas le cas. Une manière de résoudre ce paradoxe apparent est de faire appel à une atmosphère archéenne riche en gaz à effets de serre tels que le CH_4 , le CO_2 et l' H_2O . Cette question de la température de surface à l'archéen est très débattue, surtout depuis que les études, il y a 30 ans, des compositions isotopiques de l'oxygène des silex archéens (les roches sédimentaires archéennes les mieux préservées, Fig 2) ont montré des valeurs très particulières indiquant des températures de l'ordre de 70°C pour les océans il y a 3,5 Ga. Nos travaux récents ont confirmé la possibilité d'une température aussi chaude pour les océans archéens à partir de l'étude des compositions isotopiques du silicium, l'autre constituant majeur avec l'oxygène des silex (Fig 3). Depuis ces travaux, des biologistes américains ont réussi à montrer, en ressuscitant des fragments de gènes anciens à partir d'une modélisation statistique de l'évolution à l'envers et en clonant des bactéries avec ses fragments, que la température du milieu de vie des bactéries à l'archéen semble avoir été en accord avec les valeurs déduites de l'étude des silex. Nos travaux actuels essaient d'améliorer la précision de ces reconstitutions de paléotempératures dont l'importance pour la compréhension de l'origine et de l'évolution précoce de la vie est évidente.

Quelques-uns de nos articles récents sur ces travaux :

- Brownlee D. et al. (2006) Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science* 314, 1711-1716.
- Chaussidon M., Robert F. & McKeegan K. D. (2006) Li and B isotopic variations in an Allende CAI: evidence for the in situ decay of short-lived ^{10}Be and for the possible presence of the short-lived nuclide ^7Be in the early solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 224-245.
- Hashizume K. & Chaussidon M. (2005) A non-terrestrial ^{16}O -rich isotopic composition for the protosolar nebula. *Nature* 434, 619-622.
- Hashizume K., Chaussidon M., Marty B. & Robert F. (2000) Solar Wind Record on the Moon: Deciphering Presolar from Planetary Nitrogen. *Science* 290, 1142-1145.
- Libourel G. & Krot A. N. (2007) Evidence for the presence of planetesimal material among the precursors of magnesian chondrules of nebular origin. *Earth and Planetary Science Letters* 254, 1-8.
- Libourel G., Krot A. N. & Tissandier L. (2006) Role of gas-melt interaction during chondrule formation. *Earth and Planetary Science Letters* 251, 232-240.
- McKeegan K. D., Chaussidon M. & Robert F. (2000) Incorporation of short-lived ^{10}Be in a Calcium-aluminum-rich inclusion from the Allende meteorite. *Science* 289, 1334-1337.
- McKeegan K. D. (2006) Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science* 314, 1724-1728.
- Marin J., Chaussidon M. & Robert F. (sous presse) Micro-scale oxygen isotope variations in 1.9 Ga Gunflint cherts: assessments of diagenesis effects and implications for oceanic paleotemperature reconstructions *Geochimica et Cosmochimica Acta*
- Marty B., Zimmermann L., Burnard P. J., Wieler R., Heber V. S., Burnett D. L., Wiens R. & Bochsler P. (sous presse) Nitrogen isotopes in the recent solar wind from the analysis of Genesis targets : Evidence for large scale isotope heterogeneity in the early Solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*
- Pujol M., Marty B., Burnard P.J. & Philippot P. (sous presse) Xenon in Archean Barite: weak decay of ^{130}Ba , mass-dependent isotopic fractionation and implication for barite formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*
- Robert F. & Chaussidon M. (2006) A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts. *Nature* 443, 969-972.
- Toppani A., Libourel G., Robert F. & Ghanbaja J. (2006) Laboratory condensation of refractory dust in protosolar and circumstellar conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 5035-5060.
- Toppani A., Robert F., Libourel G., de Donato P., Barres O., D'Hendecourt L., & Ghanbaja J. (2005) A 'dry' condensation origin for circumstellar carbonates. *Nature* 437, 1121-1124.
- Villeneuve J., Chaussidon M. & Libourel G. (2009) Homogeneous distribution of ^{26}Al in the Solar system from the Mg isotopic composition of chondrules. *Science* 325, 985-988.



Ouvrage collectif de la Commission de Protection des Eaux, du Patrimoine, de l'Environnement, du Sous-sol et des Chiroptères de Lorraine (CPEPESC Lorraine)

Coordination et rédaction :

François SCHWAAB et Alexandre KNOCHEL

Numéro spécial de la revue CICONIA - Vol. 33 - 2009
Relié 564 pages - 17 cm x 24 cm - 40,00 Euros
ISBN : 978-2-9533006-0-4

« CONNAÎTRE ET PROTÉGER LES CHAUVES-SOURIS DE LORRAINE »

constitue un atlas traitant des 22 espèces représentées dans la région, soit un tiers de ses Mammifères. Il couvre la période 1984-2007 soit 23 hivers et 23 étés. Fruit d'un travail de synthèse de François SCHWAAB, Alexandre KNOCHEL et Dorothée JOUAN, cet ouvrage est d'abord le résultat de l'exploitation de la base de données régionale. Cet outil informatique centralise sur la période 43 230 données recueillies par plus de 170 observateurs sur 11 980 sites. Une synthèse de la bibliographie chiroptérologique européenne est également réalisée.

Décliné à l'échelon régional, l'ouvrage cerne tout d'abord la « Lorraine des Chiroptères », le contexte géographique, géomorphologique, écologique et socio-économique. Suit une brève présentation de la biologie et de l'éco-éthologie de l'ordre. Un premier chapitre traite de l'histoire de la chiroptérologie et un deuxième aborde l'étude et la protection des Chiroptères. Enfin et surtout, le troisième, après une explication de la méthode suivie, présente au lecteur les 22 espèces représentées en Lorraine au travers de monographies très complètes.

Connaître et Protéger les Chauves-souris de Lorraine

Analyse de l'ouvrage par Annette LEXA-CHOMARD
Docteur ès sciences biologiques, auteure et expert scientifique

Cet ouvrage collectif, vient combler une lacune bibliographique en France, même s'il est spécifiquement dédié aux 22 espèces de Chauves-souris en Lorraine. Il est le fruit d'une initiative prise il y a 25 ans à l'origine de laquelle on trouve des membres de la Société d'Histoire naturelle de la Moselle - Bernard Hamon, Yves Gérard - qui lancèrent le projet de l'élaboration d'une base de données informatisée, débutée dans les années 80, enrichie désormais par l'intégration de l'enregistrement du géoréférencement. Ces derniers, avec les coordinateurs de l'ouvrage François Schwaab et Alexandre Knochel, s'inscrivent en dignes successeurs d'une longue lignée de naturalistes dont l'ouvrage nous recense l'historique : les premiers représentants de la SHNM (Jean Jacques Holandre, Alfred Malherbe, Dominique Fournel puis l'Abbé Kieffer) et aussi Dominique Alexandre Godron, Hubert Mathieu et surtout Henri Heim de Balsac. Les Chiroptères représentent le 2e ordre de mammifères après les Rongeurs, avec plus de 1000 espèces de part le monde et 39 en Europe. Mais les chauves-souris sont particulièrement menacées par les activités humaines (aménagement des espaces avec disparition des corridors de chasse et de déplacement, pesticides...) alors qu'elles sont d'excellents indicateurs de la qualité de l'environnement, comme les lichens. En outre les chauves-souris mangent quotidiennement des milliers d'insectes, notamment nuisibles pour l'agriculture. Cet atlas régional s'inscrit dans la droite ligne de la dynamique européenne engagée contre « l'érosion de la biodiversité ». Depuis 1997, un vaste programme transfrontalier aboutit à la création d'un réseau de surveillance des gîtes de ces animaux menacés. L'enjeu en Lorraine est important parce que la région possède des habitats privilégiés (forêts, milieux souterrains naturels, anciens sites d'exploitation de roches et minerais, nombreux ouvrages militaires...)

Paradoxalement, alors que la technocratie utilitariste a envahi les programmes d'enseignements de la biologie, ce travail vient contredire l'idée que l'observation naturaliste est une activité en voie de disparition. Le recul de 25 ans montre à quel point le nombre d'observations, de sites répertoriés a augmenté avec les années, particulièrement depuis 1998. Ce réseau repose sur le bénévolat, faut-il le

rappeler. Et cette passion qui anime ces observateurs infatigables, à valeur économique nulle, reconforte. L'ouvrage nous propose une partie traitant de la biologie et l'écologie générale des chiroptères, dans laquelle on peut regretter simplement l'absence de données évolutives et phylogéniques, liées au passé géologique et climatologique en Lorraine. L'évolution du suivi des sites d'observations, des effectifs, de la répartition altitudinale, des effectifs des femelles et de jeunes dans les nurseries, offre désormais des indicateurs fiables pour les sites à protéger en priorité (poses de grilles, arrêtés préfectoraux, bail emphytéotiques, classements ENS, Natura 2000, RNR, RNN...)

Ce travail considérable ne doit pas rester l'affaire de spécialistes mais doit déboucher sur des actions de sensibilisation concrète des populations et des acteurs régionaux : actions au niveau des bâtiments publics (mairie, écoles, église...), conservation de vieux arbres, îlots de vieillissement, haies et ripisylves, gestion de la menace des éoliennes. Des explications ont été invoquées comme le fait que les poumons des chauves-souris seraient plus sensibles que les oiseaux au barotraumatisme qui survient lorsque le mammifères se rapprochent des pales de l'éolienne, phénomène indétectable pour les chauves-souris plus sensibles à ces dépressions subites que les oiseaux, mais cela pourrait être tout aussi bien et plus simplement la hauteur de vol.

Les chauves-souris peuvent aussi être intoxiquées par les produits biocides des charpentes traitées : là aussi les idées ne manquent pas comme indiquer les produits à éviter, privilégier le traitement en hiver, sensibiliser via les magasins de bricolage, les professionnels des extermination d'animaux « nuisibles »...

A cet égard, on regrette un peu que le livre n'expose pas de méthodologie et les précautions à prendre en cas de découverte d'une colonie ou d'un individu isolé ni n'aborde l'aspect sanitaire : que faire en cas de morsure ? En effet il faut rappeler que les chauves-souris peuvent être vecteurs de la transmission d'épizooties et de la rage chez l'homme, le bétail et les animaux domestiques particulièrement la Séroline commune.

Quoiqu'il en soit cet ouvrage est remarquable, pas seulement par sa qualité scientifique mais parce qu'il donne envie de croire que rien n'altèrera la passion et l'énergie des amoureux de la nature, pour peu que des moteurs tels que les politiques européennes et régionales les soutiennent. Cet ouvrage en est un bel exemple.

Archéologie des enceintes urbaines et de leurs abords en Lorraine et en Alsace (XII^e-XV^e siècle)

Sous la direction de
Yves Henigfeld et Amaury Masquilier

Ouvrage édité par la Revue Archéologique de l'Est,
Dijon, décembre 2008, 539p
XXVI^e supplément
ISBN : 2-915544-09-3

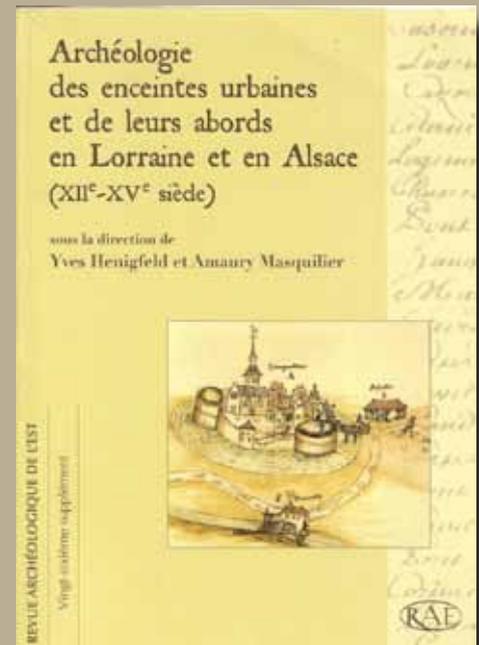
Analyse de l'ouvrage
par **Christian Pautrot**
Président de la Société d'Histoire
Naturelle de Moselle

Plus que le compte-rendu des dernières fouilles ayant eu lieu sur les enceintes urbaines lorraines depuis une vingtaine d'années, cet ouvrage conséquent est une somme concernant les données recueillies depuis des siècles sur le développement des agglomérations depuis leur fondation ou l'accélération de leur emprise au Moyen-âge. On y trouve donc, avec certes des variantes en fonction des auteurs, tout ou partie des documents accumulés dans les collections privées puis dans les bibliothèques et services d'archives de nos départements, ce qui constitue une synthèse très appréciable pour les chercheurs qui doivent habituellement hanter de nombreux sites avant de pouvoir se faire une idée objective du développement urbain.

Dix-huit villes d'étendue très variable sont ainsi étudiées soit moins de 10% du total des villes d'Alsace et de Lorraine. Il s'agit pour les auteurs de comprendre les processus de formation urbaine, notamment dans les petites agglomérations en général beaucoup moins connues que les grandes cités d'origine antique. Alors que jusqu'à la dernière guerre, un tel travail n'était souvent que livresque ou était mené à partir d'éléments en élévation survivants des aléas du temps, la multiplication des grandes opérations immobilières parfois liées à la reconstruction mais plus souvent à une volonté politique de faire table rase du passé architectural des villes a amené à la destruction massive et programmée de quartiers entiers, offrant aux archéologues la possibilité souvent limitée dans le temps d'observer dans les trois dimensions des vestiges du passé. La création de services assurant des fouilles préventives avant les opérations immobilières à partir de 1980 a été à cet égard un apport primordial, suivi peu de temps après,

d'opérations de diagnostics effectuées à l'intérieur même des locaux avant toute destruction. Alors que la trame des différents articles de cet ouvrage est standardisée et prouve que l'archéologie n'est plus le seul fait de littéraires mais aussi de scientifiques, leur contenu est très variable dans le détail, non seulement en raison de la richesse très variable des résultats observés, mais aussi du fait des auteurs eux-mêmes. Certains renouent avec bonheur avec la tradition en faisant précéder leur propos d'une introduction toujours bienvenue alors que d'autres entrent de manière un peu abrupte dans le vif du sujet. La partie historique s'appuyant sur les sources anciennes, est de qualité très variable selon que l'auteur est un historien habitué à la recherche en archives ou plutôt un scientifique n'accordant foi qu'à l'analyse des vestiges exhumés. Cette partie ne s'appuie parfois que sur des sources récentes dont l'âge dépasse à peine deux décennies, ce qui est un peu léger pour des cités médiévales. Ainsi, alors que certains articles offrent une agréable débauche de reproductions de documents anciens et multiplient les références à des recherches passées, d'autres ne sont guère diserts à cet égard. L'abondance d'illustrations extraites des rapports de fouilles montrant des plans et coupes est fort intéressante mais peut-être parfois un peu trop présente sans apporter d'informations fondamentales, si ce n'est le constat que la stratigraphie des ensembles urbains est souvent fort complexe. Le fait d'extraire ainsi des documents d'un rapport non prévu pour la vulgarisation mène parfois à l'écueil d'une localisation problématique des coupes par rapport aux plans partiels et surtout par rapport au plan général de la localité étudiée. Nous noterons, malgré ces quelques remarques la grande qualité des illustrations proposées.

L'intérêt de cet ouvrage pour les non initiés devrait être, parmi beaucoup d'autres choses, l'utilisation de nouvelles méthodes de diagnostic. Les méthodes de datation par dendrochronologie et utilisation de la décroissance radioactive sont maintenant bien connues mais on peut toutefois regretter que plusieurs rapports fassent l'impasse quasi totale des méthodes de datation traditionnelles utilisant la céramique et la numismatique. Bien que ces objets soient plus mobiles dans le temps que les restes ligneux, ils devraient au moins être signalés ne serait-ce que pour discuter la validité des résultats obtenus par les diverses méthodes. Parmi les techniques récentes, la microtopographie donne des résultats passionnants



dans les zones non fouillées.

Un effort louable d'exhaustivité quant à la fourniture de renseignements touchant le maximum de disciplines est à signaler. Il induit logiquement une certaine approximation quand il s'agit de la datation des formations géologiques rencontrées par des non spécialistes.

Une excellente conclusion fait suite aux monographies et rappelle les objectifs de cette étude magistrale, apports scientifiques, méthodologiques, cartographiques et bibliographiques.

Il apparaît donc que malgré quelques rares imperfections, *Archéologie des enceintes urbaines et de leurs abords en Alsace et Lorraine du XII^e au XV^e siècle* constitue un ouvrage de référence incontournable pour qui s'intéresse au Moyen-âge, à l'évolution des techniques et à l'intégration du bâti dans son environnement, rapportées aux conditions politiques et économiques du moment. C'est grâce à la prise en compte certes bien tardive mais résolue des vestiges du passé et à la mise en place de l'obligation des opérations archéologiques préventives que cette synthèse doit son existence. Il reste à souhaiter que de tels programmes de recherche continuent à voir le jour dans toutes les localités, utilisant au besoin le canevas fort pertinent élaboré par les équipes ayant travaillé à ce projet multirégional.

